

基于光谱诊断的氩氮 TIG 焊电弧物理特性分析

肖 笑^{1,2}, 张柯柯¹, 李 芳², 华学明²

(1. 河南科技大学, 洛阳 471023; 2. 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 混合气体保护焊能够提高焊接质量及生产效率, 由于混合气体保护焊电弧成分复杂多变, 对其物理性能等的研究具有一定的难度. 文中以氩氮混合气体钨极惰性气体保护焊 (TIG 焊) 电弧为研究对象, 采用双电荷耦合元件 (CCD) 电弧光谱图像采集试验系统, 获取氩氮混合气体 TIG 焊电弧 Ar I 及 N I 的特征谱图像的动态分布; 结合双元素双组分标准温度法对不同浓度 (50%Ar + 50%N₂, 80%Ar + 20%N₂ 及 100%Ar) 的氩氮电弧进行光谱诊断. 结果表明, 电弧半径最高收缩 50% 左右, 温度最高升高 12%. 通过对氩氮电弧物理性能的定量分析为研究混合气体保护焊焊缝成形的本质奠定了理论基础.

关键词: 氩氮混合气体钨极惰性气体保护焊; 光谱测量; 标准温度法

中图分类号: TG 403 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.2019400313

0 序 言

为了保证焊接接头质量并提高生产效率, 混合气体保护焊得到了广泛的应用^[1]. 利用氩氮混合气体的钨极惰性气体保护焊 (TIG 焊) 常用于铜及其合金^[2] 以及不锈钢^[3] 等的焊接中, 并获得了良好的焊缝成形及较大的熔深.

国内外学者从焊接工艺的角度对氩氮混合气体 TIG 焊开展了研究. 刘林等人^[4] 等利用双层气体保护 TIG 焊, 将外层通入活性气体 (O₂ 或 N₂), 显著增加焊接熔深, 改善焊缝性能. Tseng 等人^[5] 通过对 304 不锈钢的氩氮混合气体 TIG 焊研究, 认为随着氮气的增加, 残余铁素体含量降低, 角变形增加. 李一楠等人^[6] 利用氩氮混合气体 TIG 焊得到了中厚紫铜试件良好的焊缝熔深形状和焊缝表面成形. 以上学者的研究表明氩氮混合气体 TIG 焊可以增加熔深, 改善焊缝成形. 然而, 焊缝的成形质量得到改善的根本原因在于焊接电弧的性质发生了变化, 国内外学者在氩氮混合气体 TIG 焊成形工艺研究的基础上, 分析了其电弧的物理特性. 但是, 氩氮混合气体 TIG 焊电弧属于双组分电弧, 在焊接前均匀混合的氩氮保护气体在焊接过程中其浓度进行了

重新分配, 相对于纯氩 TIG 焊而言, 混合气体保护 TIG 焊的电弧物理特性变得复杂, 因此对其研究较为有限. 雷玉成等人^[7] 利用数值模拟的方法分析了氩氮混合气体 TIG 焊电弧, 认为加入氮气后得到了更高能量密度的电弧. 然而数值模拟是建立在模型及假设之上的, 需要用试验的方法进行验证. 国内外学者也开展了对氩氮混合气体 TIG 焊电弧的试验研究. 杨秀青^[8] 利用氩氮混合保护气体 TIG 焊焊接铝合金, 随着在氩氮混合气体中 N₂ 含量的增加, TIG 焊电弧高亮区逐渐向阳极延伸, 电弧电压升高且波动范围越大. 李桓等人^[9] 利用多线绝对强度法计算了氩氮电弧的温度分布, 认为氩氮电弧具有高热特性. Murphy^[10] 利用双元素双组分标准温度法测量了氩氮电弧的温度, 质量浓度分布. 然而, 以上的试验研究均利用光谱仪逐点扫描电弧, 氩氮电弧中每一位置的物理特性均测量于不同的电弧, 不能满足焊接电弧实时动态变化的需求. 因此, Xiao 等人^[11] 利用基于双电荷耦合元件 (CCD) 的电弧图像采集试验系统, 实现了某一组分氩氮电弧物理特性的动态诊断, 缺乏氮气对混合气体保护焊电弧物理特性影响的分析.

文中利用双 CCD 的电弧图像采集试验系统, 根据双元素双组分标准温度法对不同组分的氩氮混合气体 TIG 焊电弧进行光谱诊断, 分析其物理特性的变化规律, 定量分析氮气对氩氮混合气体 TIG 焊电弧物理性能的影响, 为混合气体浓度的选择及

收稿日期: 2019 - 01 - 15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51705137); 中国博士后科学基金第 63 批面上项目 (2018M632770); 河南省国际科技合作项目 (172102410079)

成形工艺的研究奠定理论基础。

1 试验系统

为了实现氩氮混合气体 TIG 焊电弧物理场特性的实时动态诊断,文中所采用的基于双 CCD 的电弧光谱图像实时采集试验系统如图 1 所示。它主要由两部分组成,分别为氩氮混合气体 TIG 焊系统及光谱图像采集系统。

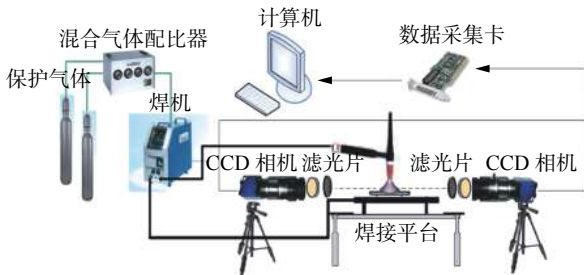


图 1 双 CCD 电弧光谱图像实时采集试验系统示意图
Fig. 1 Schematic image of spectral information on-line acquisition experimental system with double CCD

氩氮混合气体 TIG 焊系统主要包括焊接电源,水冷铜板及氩氮混合气体配比系统。焊接电源采用 OTC 公司 DA300P 型号的 TIG 焊焊机。为了研究便于氩氮电弧的特性,阳极选用水冷铜板,其尺寸为 $100\text{ mm} \times 90\text{ mm} \times 9\text{ mm}$,从而抑制金属蒸气的产生。氩氮混合气体配比系统选用德国 WITT 的 KM30-4 的四元特定气体混配器,通过调节旋钮获取不同的氩氮混合气体比例。文中选用的焊接保护气体的摩尔浓度分别为 $50\%\text{Ar} + 50\%\text{N}_2$ 及 $80\%\text{Ar} + 20\%\text{N}_2$,氩氮混合气体 TIG 焊的试验参数如表 1 所示。

表 1 氩氮混合气体 TIG 焊试验参数

Table 1 Welding parameters for Ar-N arc plasma in DC TIG welding

焊接电流 /A	弧长 /mm	混合气流量 $q/(L \cdot \text{min}^{-1})$	钨极直径 D/mm	钨极角度 $\theta/(\text{°})$
200	5	15	2.4	60

光谱图像采集系统主要包括两组 CCD 光谱图像采集装置及 CCD 同步装置等。每组 CCD 光谱图像采集装置包括一组中性减光片,一片特定波长的窄带滤光片,一个定焦镜头以及一个 CCD 传感器。假定氩氮电弧为柱对称的热源,将两组 CCD 光学图像采集装置分别放置于电弧的两侧,且与氩氮电

弧保持在同一水平轴线上。窄带滤光片分别选择中心波长为 794.8 nm 的 Ar I 谱线,其半高宽为 3 nm ;以及中心波长为 904.6 nm 的 N I 谱线,其半高宽为 7 nm 。为了保证两组光谱图像采集的同步性,采用配置相同的两组 CCD 光学采集装置,并利用 Labview 编写同步触发程序,实现两组光谱图像的实时同步采集与存储。所采用的 CCD 传感器为上海纬朗光电科技的 BASLER(acA1600-20gc),镜头为大恒图像 Computar 系列的 M7528-MP,帧频为 20 帧/s 。

2 计算原理与方法

当粒子从高能级 u 跃迁到低能级 l 时,辐射一定波长的谱线,其特征谱发射系数可表示为

$$\varepsilon_v = \frac{h\nu_{ul}}{4\pi} A_{ul} \frac{n(T, Y)}{Z(T, Y)} g_u \exp\left(-\frac{E_u}{kT}\right) \quad (1)$$

式中: ε_v 为电子由高能级 u 向低能级 l 跃迁时的发射系数; ν_{ul} 为电子由高能级 u 向低能级 l 跃迁时的频率; A_{ul} 为频率为 ν 的谱线跃迁几率; $n(T, Y)$ 为浓度为 Y , 温度为 T 时的粒子数密度; $Z(T, Y)$ 为浓度为 Y , 温度为 T 时的配分函数; E_u 为高能级 u 对应的能量; k 为玻尔兹曼常数。

由公式可知,发射系数是温度和浓度的函数,可计算出双元素双组分标准温度法的计算原理图,即 Ar I 794.8 nm 及 N I 904.6 nm 谱线与温度及浓度之间的等发射系数图,如图 2 所示。

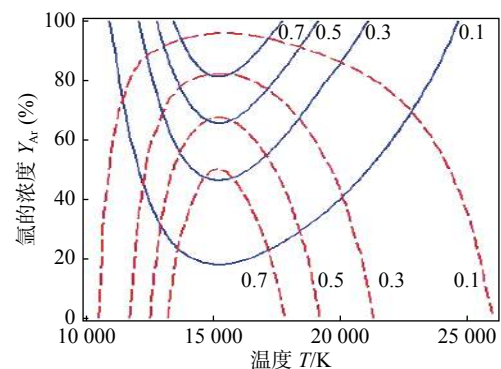


图 2 Ar I 794.8 nm (实线)及 N I 904.6 nm (虚线)谱线与温度及浓度之间的等发射系数图

Fig. 2 Emission coefficient contour for temperature and mole fraction of Ar I 794.8 nm and N I 904.6 nm spectra

根据试验采集的氩氮混合气体 TIG 焊电弧的两幅特征谱电弧图像,可提取出每个特征谱电弧相

对强度分布,并利用 Abel 变换将相对强度值变换为相对发射系数值,结合图 2 的双元素双组分标准温度法^[11]即可获得氩氮混合气体 TIG 焊电弧的温度场及浓度场分布。

3 结果与讨论

氩氮混合气体 TIG 焊可用于焊接紫铜,当氮气浓度超过 50% 时,会产生较多烟雾.因此,文中选用 50%Ar + 50%N₂, 80%Ar + 20%N₂ 以及 100%Ar 三种体积分数的保护气体进行光谱诊断。

利用双 CCD 电弧光谱图像实时采集试验系统,可同时获取 50%Ar + 50%N₂ 电弧的特征谱 Ar I 794.8 nm 强度分布图像和特征谱 N I 904.6 nm 强度分布图像,利用双元素双组分标准温度法进行逐行计算,就可以得到 50%Ar + 50%N₂ 电弧的等温图和等摩尔浓度图,如图 3 所示。

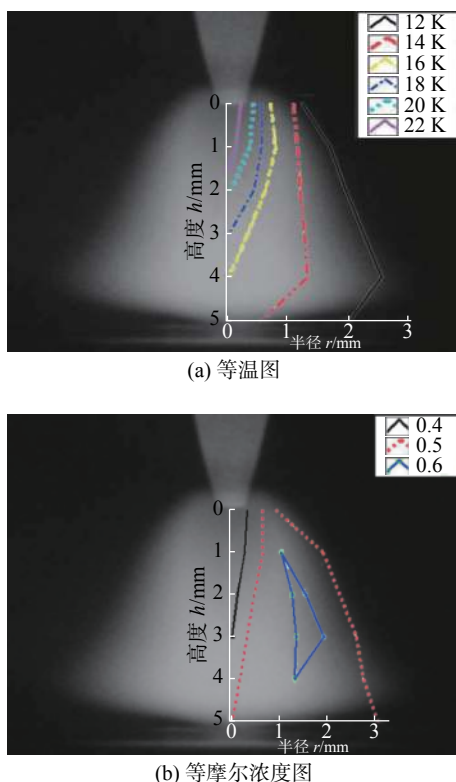


图 3 50%Ar+50%N₂ 电弧等离子体的温度及浓度分布
Fig. 3 Temperature and mole fraction contour in 50%Ar+50%N₂ TIG welding

利用文中试验系统也可以得到 80%Ar + 20%N₂ 电弧的特征谱 Ar I 794.8 nm 强度分布图像和特征谱 N I 904.6 nm 强度分布图像,利用双元素双组分标准温度法计算出 80%Ar + 20%N₂ 电弧的等温图和等摩尔浓度图,如图 4 所示。

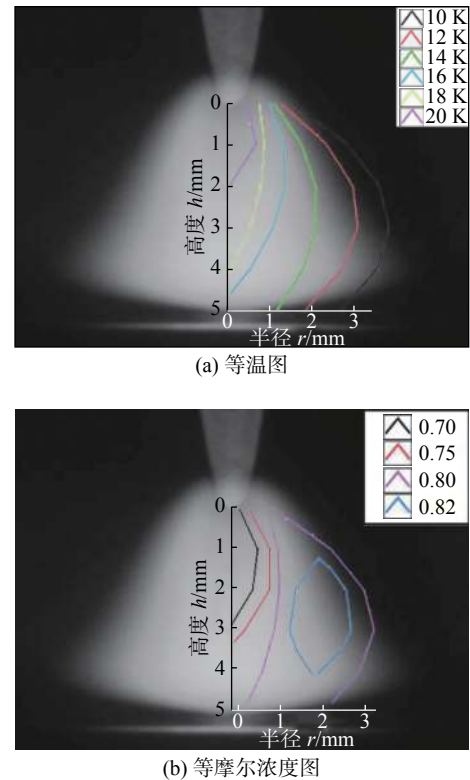


图 4 80%Ar+20%N₂ 电弧等离子体的温度及浓度分布
Fig. 4 Temperature and mole fraction contour in 80%Ar+20%N₂ TIG welding

利用文中试验系统获得 100%Ar 电弧的特征谱图像及计算出的电弧等温图如图 5 所示。

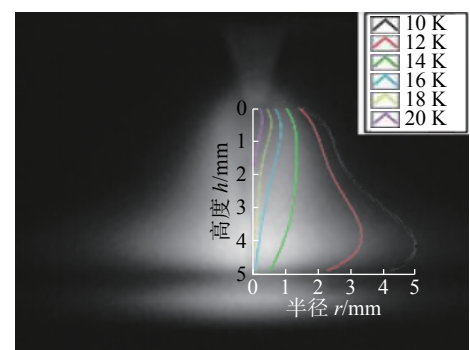


图 5 100%Ar 电弧的等温图
Fig. 5 Temperature contour in 100%Ar TIG welding

对比分析 50%Ar + 50%N₂, 80%Ar + 20%N₂ 及 100%Ar 电弧的特征谱强度图像可知,随着氮气含量的增加,电弧体积明显减小.距钨极正下方 1, 2, 3, 4 mm 位置处不同浓度电弧的半径分布如图 6a 所示,与 100%Ar 电弧相比,50%Ar + 50%N₂ 电弧在距离钨极下方 1 mm 位置处收缩 37.7%,在距离钨极下方 4 mm 位置处收缩 50.8%。

对比分析 50%Ar + 50%N₂, 80%Ar + 20%N₂ 及 100%Ar 电弧的温度分布可知,随着氮气含量的增

加,电弧的整体温度明显升高.距钨极正下方 1, 2, 3, 4 mm 位置处不同浓度电弧的温度分布如图 6b 所示,与 100%Ar 电弧相比,50%Ar + 50%N₂ 电弧在距离钨极下方 1 mm 位置处温度升高 12%,在距离钨极下方 4 mm 位置处温度升高 1.9%.

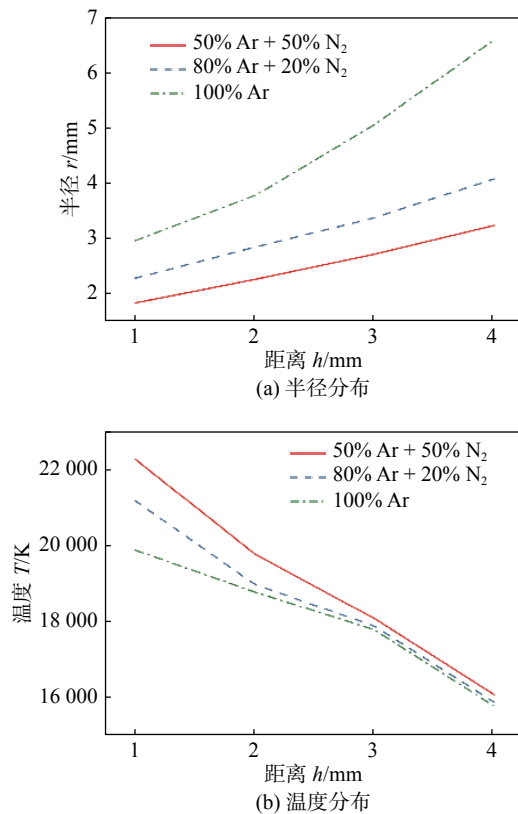


图 6 距钨极正下方 1, 2, 3, 4 mm 位置处不同浓度电弧半径及温度分布图

Fig. 6 Radius and temperature distribution away from tungsten 1, 2, 3, 4 mm with different mole fraction

4 结 论

(1) 采用双 CCD 电弧光谱图像采集试验系统,获取了不同组分的氩氮混合气体 TIG 焊电弧的特征谱图像,随着氮气含量的增加,电弧出现不同程度的收缩,与 100%Ar 电弧相比,50%Ar + 50%N₂ 电弧的半径收缩 37.7%~50.8%.

(2) 利用双元素双组分标准温度法,计算出了不同浓度的氩氮混合气体 TIG 焊电弧温度,随着氮气含量的增加,电弧的整体温度明显升高.与 100%Ar 电弧相比,50%Ar + 50%N₂ 电弧的温度升高 1.9%~12%.

参考文献:

- [1] Huang Y, Ren C, Ren Q. The element transfer behavior of gas pool coupled activating TIG welding[J]. China Welding, 2018, 27(4): 5-13.
- [2] Satheeshkumar K V, Gejendhiran S, Prasath M. Comparative investigation of mechanical properties in GMAW/GTAW for various shielding gas compositions[J]. Advanced Manufacturing Processes, 2014, 29(8): 996-1003.
- [3] Zhang Z Q, Jing H, Xu L, et al. Effects of nitrogen in shielding gas on microstructure evolution and localized corrosion behavior of duplex stainless steel welding joint[J]. Applied Surface Science, 2017, 404: 110-128.
- [4] 刘林. 双层气体保护 TIG 焊电弧非平衡特性的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [5] Tseng K H, Chou C P. The study of nitrogen in argon gas on the angular distortion of austenitic stainless steel weldments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142(1): 139-144.
- [6] 李一楠. N₂-Ar 混合气体保护钨极氩弧焊接 10 mm 紫铜厚板工艺[J]. 电焊机, 2013, 43(9): 63-68.
Li Yanan. N₂-Ar gas tungsten arc welding of 10 mm copper plates[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(9): 63-68.
- [7] 雷玉成, 李彩辉, 郁雯霞, 等. 氮氩气体保护 TIG 焊接电弧数值分析[J]. 焊接学报, 2006, 27(11): 25-28.
Lei Yucheng, Li Caihui, Yu Wenxia, et al. Numerical analysis of N₂-Ar protecting tungsten inert gas welding arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(11): 25-28.
- [8] 杨秀青. 混合保护气体对铝合金 TIG/MIG 焊的影响[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016.
- [9] 李桓, 李俊岳. 钨极氩-氮电弧的高热特性[J]. 焊接学报, 1993, 14(2): 125-130.
Li Huan, Li Junyue. High thermal characteristic of argon-nitrogen TIG arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1993, 14(2): 125-130.
- [10] Murphy A B. Modified fowler-milne method for the spectroscopic measurement of temperature and composition of multielement thermal plasmas[J]. Review of Scientific Instruments, 1994, 65(11): 3423-3427.
- [11] Xiao X, Hua X, Li F, et al. Spectroscopic measurement of temperature and gas composition in Ar-N₂ shielded TIG welding[J]. Welding in the World, 2016, 60(6): 1287-1296.

第一作者简介: 肖笑, 1985 年出生, 博士, 讲师. 主要研究方向为焊接电弧物理. 发表学术论文 10 余篇. Email: xiaoxiaonv@163.com

通信作者简介: 李芳, 女, 博士, 助理研究员. Email: lifang302@sjtu.edu.cn