

基于标准温度法的脉冲 TIG 焊电弧温度场计算与分析

肖笑^{1,2}, 华学明^{1,2*}, 吴毅雄^{1,2}, 李芳^{1,2}

1. 上海交通大学材料科学与工程学院焊接工程技术研究所, 上海 200240

2. 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

摘要 脉冲 TIG 焊由于其优越的特性而广泛应用于工业中, 准确测量电弧温度对分析焊接过程有重要意义。论文基于光谱学理论计算了氩元素的粒子数密度与温度之间的关系曲线, 计算了 794.8 nm 氩原子谱线的发射系数与温度之间的关系曲线, 利用高速摄影获得了 794.8 nm 特征谱的电弧图像, 根据 Abel 变换和标准温度法计算了脉冲 TIG 焊峰值时刻和基值时刻的电弧温度场分布。

关键词 脉冲 TIG 焊; 电弧温度场; 标准温度法

中图分类号: TG403 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)09-2327-04

引言

脉冲 TIG 焊对焊件热输入少, 电弧能量集中且挺度高, 焊接试件变形小, 有利于薄板、超薄板焊接; 不仅可以精确地控制热输入和熔池尺寸, 而且可以得到均匀的熔深, 适合于单面焊双面成形和全位置焊接, 因此广泛应用于工业中。焊接电弧属于低温热等离子体, 电弧温度是描述电弧等离子体物理特性的最重要参数之一, 准确测量电弧温度对分析焊接过程有重要意义。电弧温度的测量方法主要有郎缪尔探针法^[1]、激光散射法^[2]以及光谱法^[3-13]等。光谱法由于信息量大, 测量方便而得到广泛应用。许多学者利用光谱法测量了 TIG 焊电弧等离子体的温度, 由于测量参数存在差别, 测量的结果很难进行比较。但是, Thornton 认为^[12]用标准温度法测量等离子体所得到的结果有很好的 consistency。

Farmer 等^[3-6, 10-13]利用标准温度法对 TIG 焊氩气保护的电弧等离子体进行了测量。Hada 等^[3, 4, 6, 10, 11]采用 696.5 nm 的氩原子谱线进行测量, Thornton^[12]对多条谱线进行测量, 计算电弧等离子体的温度, 并分析了不同谱线的优缺点。Hiraoka^[5], Vilarinho^[13]对 696.5 nm 和 480.7 nm 的谱线进行了测量。

国内学者也用标准温度法测量 TIG 焊电弧等离子体温度, Ma 等^[7-9]选用了 794.8 nm 的氩原子谱线。但是, 利用标准温度法测量脉冲 TIG 电弧的温度却很少, 只有三位学者^[9, 11]分析了脉冲 TIG 焊的电弧温度变化特点。本工作利

用标准温度法测量并计算了脉冲 TIG 焊基值时刻和峰值时刻的电弧强度和温度分布。

1 计算原理与方法

1.1 基于标准温度法的电弧温度场计算原理概述

(1) 用实验系统拍摄电弧图像, 获得电弧图像的强度分布。由于电弧自身的不稳定性、CMOS 图像传感器本身的噪声以及周围环境的影响导致电弧图像存在噪声, 因此需要对电弧图像的原始强度去除噪声。(2) 对电弧图像进行对称化, 用 Bockasten 三次多项式插值方法进行 Abel 变换, 将强度值转换为发射系数值。(3) 结合标准温度法计算出电弧的温度场。标准温度法的计算原理如图 1 所示。

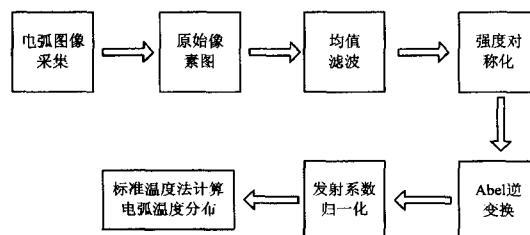


Fig. 1 Principle of Fowler-Milne method

1.2 等离子体粒子数密度的计算方法

根据 Saha 方程可以计算出不同温度下电弧中的各种粒子数密度。对于保护气体为纯 Ar 的 TIG 电弧等离子体, 考

收稿日期: 2012-04-01, 修订日期: 2012-07-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51035004)资助

作者简介: 肖笑, 1985 年生, 上海交通大学材料科学与工程学院博士研究生 e-mail: xiaoxiao2788@gmail.com

* 通讯联系人 e-mail: xmhua@sjtu.edu.cn

虑到 Ar 的二次电离, 温度为 T 的等离子体中的粒子有 Ar, Ar^+ , Ar^{2+} , e, 分别为氩原子、一次离子、二次离子和电子, 粒子数密度分别为 n_{Ar} , n_{Ar^+} , $n_{\text{Ar}^{2+}}$ 和 n_e 。总粒子数密度 n 为各粒子数密度的总和。

由理想气体方程可得

$$P = nkT = (n_e + n_{\text{Ar}^+} + n_{\text{Ar}} + n_{\text{Ar}^{2+}})kT \quad (1)$$

由于等离子体呈电中性, 有准中性方程

$$n_e = n_{\text{Ar}^+} + 2n_{\text{Ar}^{2+}} \quad (2)$$

根据一次电离的 Saha 方程可得

$$\frac{n_{\text{Ar}^+} n_e}{n_{\text{Ar}}} = 2 \frac{Z_{\text{Ar}^+}(T)}{Z_{\text{Ar}}(T)} \frac{(2\pi mkT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_{\text{Ar}_{\infty}}}{kT}\right) \quad (3)$$

根据二次电离的 Saha 方程可得

$$\frac{n_{\text{Ar}^{2+}} n_e}{n_{\text{Ar}^+}} = 2 \frac{Z_{\text{Ar}^{2+}}(T)}{Z_{\text{Ar}^+}(T)} \frac{(2\pi mkT)^{3/2}}{h^3} \exp\left(-\frac{E_{\text{Ar}_{\infty}^+}}{kT}\right) \quad (4)$$

式中只有 n_{Ar} , n_{Ar^+} , $n_{\text{Ar}^{2+}}$, n_e 和 T 为未知数, 其他均可通过查表获得, 联立求解式(1)–(4)即可获得粒子数密度随温度变化关系曲线, 如图 2 所示。

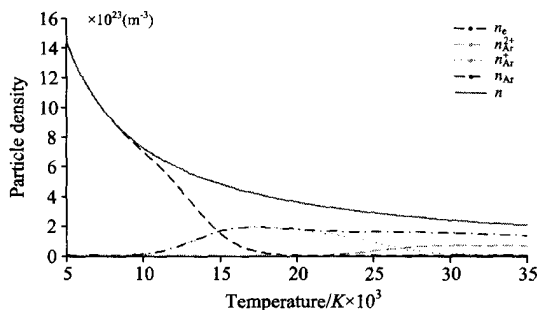


Fig. 2 Relationship between particle density and temperature

1.3 标准温度法

根据发射系数的定义及玻耳兹曼分布, 得到发射系数的表达式如下

$$\epsilon_v = \frac{h\nu_{ul}}{4\pi} A_{ul} \frac{n_{\text{Ar}}(T)}{Z(T)} g_u \exp\left(-\frac{E_u}{kT}\right) \quad (5)$$

式中, ν_{ul} , A_{ul} 分别为能级 u 到 l 的频率、跃迁概率, g_u 为能级 u 的统计权重。分析式(5), 发射系数 ϵ_v 和温度 T 的关系非单调变化, 在某个温度值下, 谱线发射系数达到极大值。这主要是由粒子数密度 $n_{\text{Ar}}(T)$ 、配分函数 $Z(T)$ 及指数项 $\exp(-E_u/kT)$ 的变化趋势所决定。其中配分函数和指数项可以通过查表得到, 粒子数密度需要通过计算获得。

根据以上原理, 计算 794.8 nm Ar 原子谱线的发射系数, 经归一化可以得到发射系数与温度之间的关系曲线, 如图 3 所示。随着温度的升高, 由于等离子体的扩大和电离, 指数项的增加和粒子数密度的降低会在某一温度达到平衡, 使发射系数达到最大值, 此温度称为标准温度, 即图中的 T^* (温度为 15 600 K)。

如果被测对象是非均匀的等离子体, 其轴线(或中心部分)的温度超过 T^* , 那么等离子体发射系数径向分布中的最大值就不在等离子体的轴线处。因此, 可以把 T^* 温度时的发射系数作为一个标准值, 并把它与其他点的测量值作比较^[14]。这种方法因为利用了谱线发射系数达到极大值时的温度 T^* 作为标准值, 故称作标准温度法。此法的主要优点在于不需要知道跃迁概率这个原子常数(对于某些原子, 其原子常数跃迁概率数据很不可靠), 因为此法用到的不是局域发射系数的绝对值 ϵ_v , 而是局域发射系数的相对值 $\epsilon_v(r)/\epsilon_v(r^*)$ 。但是, 标准温度法也有其局限性, 其一, 所测量的热离子体某些区域的温度必须超过了 T^* , 否则无法利用这个标准值; 其二, 要求 T^* 附近处的温度梯度比较大, 否则不易找准发射系数的极值。

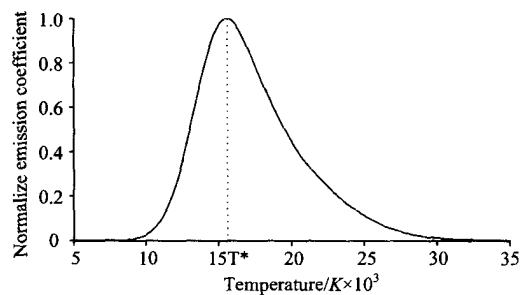


Fig. 3 Relationship between normalized emission coefficient and temperature

2 结果与讨论

2.1 实验系统

基于高速摄影的电弧光谱实验系统由两部分组成, 分别为焊接系统和光学采集系统, 如图 4 所示。

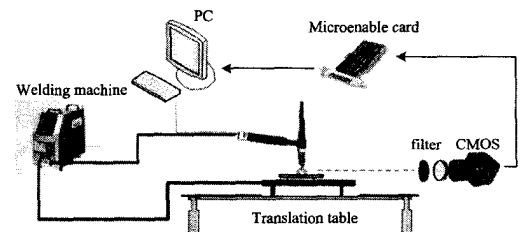


Fig. 4 High-speed camera acquisition system

焊接系统主要包括焊接电源和水冷铜极。焊接电源为 OTC 公司的 DA300P-TIG 焊机及其配套系统, 阳极材料选用水冷铜极。光学采集系统由 CMOS 传感器、摄像镜头、中性减光片和干涉滤光片组成, 干涉滤光片选择 Ar I 谱线, 中心波长为 794.8 nm, 半高宽 3 nm。电弧图像的拍摄速度为 997 帧 $\cdot$ s $^{-1}$, 曝光时间为 0.18 ms。焊接过程的实验参数如表 1 所示。

Table 1 Pulsed TIG welding parameters

焊接电流/A		频率 /Hz	占空比 /%	弧长 /mm	氩气流量 /(L $\cdot$ min $^{-1}$)	钨极直径 /mm	钨极角度 /deg	阳极 材料
基值	峰值							
200	100	1	50	5	10	2.4	60	水冷铜

2.2 结果与分析

在上述实验条件下拍摄到的脉冲 TIG 焊峰值至基值转变过程的电弧强度图像如图 5 所示。

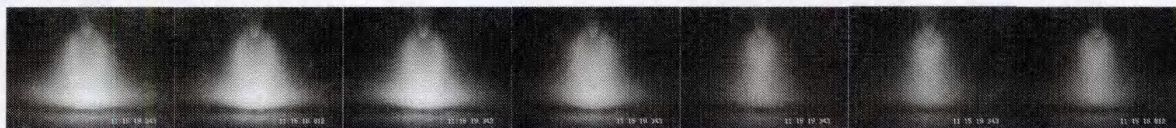


Fig. 5 Intensity image during current change

从图中可以看出脉冲焊的电弧强度有一个变化过程, 峰值时刻的电弧强度图和温度场分布如图 6 所示。电弧基值时刻的强度图和温度场分布如图 7 所示。

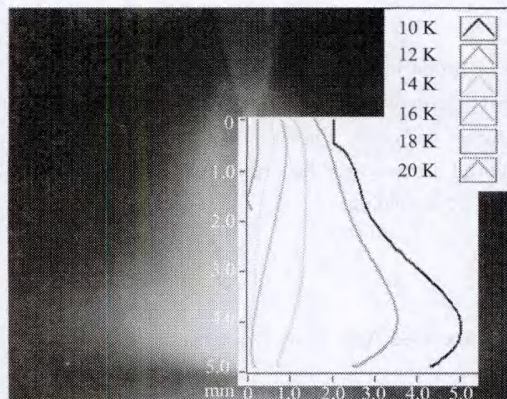


Fig. 6 Arc intensity and temperature field of peak pulsed period

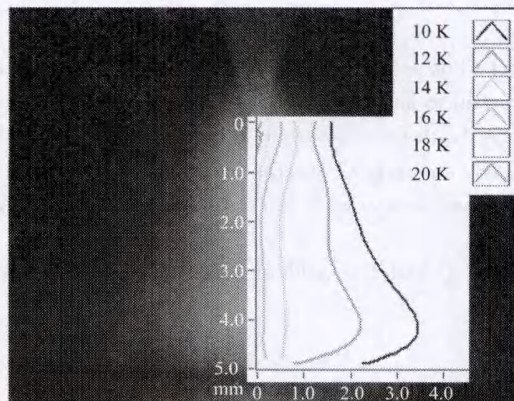


Fig. 7 Arc intensity and temperature field of base pulsed period

与峰值时刻相比, 基值时刻的电弧亮度较低, 电弧有所收缩, 高温区域减小, 但都与电弧的强度表现出了很好的一致性。

3 结 论

利用标准温度法计算了直流脉冲 TIG 焊的电弧温度场

分布, 得出以下结论:

(1) 基于光谱学理论计算出了氩元素的粒子数密度与温度之间的关系曲线, 计算出了 794.8 nm 氩原子谱线的发射系数与温度的关系曲线, 为标准温度法提供了计算依据;

(2) 采用高速摄影获得了 794.8 nm 特征谱的电弧图像, 基于 Abel 变换和标准温度法, 计算了直流脉冲 TIG 焊峰值时刻和基值时刻的电弧温度场分布。

References

- [1] Gick A, Quigley M, Richards P. Journal of Physics D: Applied Physics, 1973, 6: 1941.
- [2] Muraoka K, Kono A. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44: 043001.
- [3] Farmer A, Haddad G, Cram L. Journal of Physics D: Applied Physics, 1986, 19: 1723.
- [4] Haddad G, Farmer A. Journal of Physics D: Applied Physics, 1984, 17: 1189.
- [5] Hiraoka K, Shiwaoku T, Ohji T. Welding International, 1997, 11(9): 688.
- [6] Hsu K C, Etemadi K, Pfender E. Journal of Applied Physics, 1983, 54(3): 1293.
- [7] Ma S, Gao H, Wu L. Journal of Applied Physics, 2011, 110(2): 026102.
- [8] Ma S, Gao H, Wu L, et al. Measurement Science and Technology, 2008, 19(10): 105602.
- [9] Ma S, Gao H, Zheng S, et al. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(40): 405202.
- [10] Olsen H N. Physics of Fluids, 1959, 2(6): 614.
- [11] Sawato H, Tashiro S, Nakata K, et al. Transactions of JWRI, 2010, 39(2): 193.
- [12] Thornton M F. J. Phys. D: Appl. Phys., 1993, 26: 1432.
- [13] Vilarinho L, Scotti A. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2004, 26(1): 34.
- [14] GUO Zeng-yuan, ZHAO Wen-hua(过增元, 赵文华). Arc and Thermal Plasma(电弧和热等离子体). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1986.

Calculation and Analysis of Arc Temperature Field of Pulsed TIG Welding Based on Fowler-Milne Method

XIAO Xiao^{1,2}, HUA Xue-ming^{1,2*}, WU Yi-xiong^{1,2}, LI Fang^{1,2}

1. Welding Engineering Technology Research Institute of Materials Science and Engineering and Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China
2. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China

Abstract Pulsed TIG welding is widely used in industry due to its superior properties, and the measurement of arc temperature is important to analysis of welding process. The relationship between particle densities of Ar and temperature was calculated based on the theory of spectrum, the relationship between emission coefficient of spectra line at 794.8 nm and temperature was calculated, arc image of spectra line at 794.8 nm was captured by high speed camera, and both the Abel inversion and Fowler-Milne method were used to calculate the temperature distribution of pulsed TIG welding.

Keywords Pulsed TIG welding; Arc temperature; Fowler-Milne method

(Received Apr. 1, 2012; accepted Jul. 6, 2012)

* Corresponding author

《光谱学与光谱分析》期刊社决定采用 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统

《光谱学与光谱分析》期刊社与汤森路透集团签约,自 2010 年 12 月 1 日起《光谱学与光谱分析》决定采用 Thomson Reuters 旗下的 ScholarOne Manuscripts 在线投稿审稿系统。

- ScholarOne Manuscripts, 该系统不仅能轻松处理稿件,而且能提速科技交流。
- 全球已有 360 多家学会和出版社的 3 800 多种期刊选用了 ScholarOne Manuscripts 系统作为在线投稿、审稿平台,全球拥有超过 1 350 万的注册用户,代表着全球学术期刊在线投审稿的一流水平。
- ScholarOne Manuscripts 与 EndNote, Web of Science 无缝链接和整合;使科研探索、论文评阅和信息传播效率大为提高。
- ScholarOne Manuscripts 是汤森路透科技集团的一个业务部门,拥有丰富的学术期刊业务经验,为学术期刊提供综合管理 workflow 系统,使期刊更有效管理投稿、同行评审、加工和发表过程,提高作者心中的专业形象,缩短论文发表时间,削减管理成本,帮助期刊提高科研绩效和实现学术创新。

《光谱学与光谱分析》采用“全球学术期刊首选的在线投稿审稿系统—ScholarOne Manuscripts”,势必对 2010 年 11 月 30 日以前向本刊投稿的作者在查阅稿件信息时,会带来某些不便,在此深表歉意!为了推进本刊的网络化、数字化、国际化进程,以实现与国际先进出版系统对接;为了不断提高期刊质量,加快网络化、数字化建设,加快与国际接轨的进程,希望能得到广大作者、读者们的支持与理解,对您的理解和配合深表感激。这是一件新事物,肯定有不周全、不完善的地方,让我们共同努力,不断改进和完善起来。

《光谱学与光谱分析》期刊社

2010 年 12 月 1 日