

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.05.025

# 等离子弧焊接电弧的温度场和流场研究现状

王晓霞, 何建萍\*, 林杨胜蓝, 吉永丰

(上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620)

**摘要:**等离子体电弧温度场和流场的研究对其在工业生产中的应用具有重要的意义。文章分析了等离子弧温度场以及流场检测和计算的研究现状。在等离子弧温度场的检测中,现今光谱诊断法最为方便,所测得的结果较其他检测方法而言精确度更高;在等离子弧流场的检测中,运用粒子成像测速技术的方法可以检测得到流场分布。在等离子弧温度场和流场的计算中,数理解析法计算繁琐,需要大量时间。数值模拟的方法更为经济、有效。

**关键词:**等离子弧焊接;温度场;流场;数值模拟

中图分类号:TG47 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2015)05-0103-05

## Review on Temperature Field and Flow Field of Welded Plasma Arc

WANG Xiaoxia, HE Jianping\*, LIN Yangshenglan, JI Yongfeng

(School of Material Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** As the research on the temperature and flow field of plasma arc plays an important role in its industry application, the research status of detection and calculation of temperature and flow field on plasma arc were analyzed. In the detection of temperature field, spectrometry is most convenient and the result has higher precision than other methods. In the detection of flow field, the distribution of flow field can be detected in the use of particle image velocimetry. In the calculation of temperature and flow field, mathematical analysis is complicated and requires a lot of time. Numerical simulation is more economical and effective.

**Key words:** plasma arc welding; temperature field; flow field; numerical simulation

等离子弧焊接是使用惰性气体作为工作气和保护气,利用等离子弧作为热源来加热熔化母材金属的一种方法。由于使用了不熔的钨棒以及诸如氩之类的保护气体,等离子弧焊与钨极氩弧焊相似,但喷枪的构造不同。在等离子弧焊中,等离子弧受到严格约束,少量的纯氩气体通过钨电极周围的内孔形成等离子气体。由于约束喷嘴的挤压作用,等离子弧的电弧集中、挺拔度好、能量密度大,所以在等离子弧焊中,电弧温度高于10 000 °C是非常普遍的<sup>[1]</sup>。等离子弧焊稳定性好,焊接接头质量高,广泛应用于航天航空工业、石油工业、汽车工业等现代的制造业中。

等离子弧独有的特点和优越性,已成为国内外焊接的重要工业方法之一。等离子弧的温度场以及流场

的分布好坏直接影响着焊缝成形和焊接质量,得到了国内外学者的广泛关注。

### 1 等离子弧温度场的研究

等离子弧的温度在等离子弧焊接工艺参数上起着重要的作用,对焊接的质量好坏有直接的影响。对等离子弧的温度场进行研究,了解内部动量和能量发生的变化,对实际焊接过程具有现实意义<sup>[2]</sup>。对等离子体温度场的研究主要是通过检测和计算的方法来实现。

#### 1.1 等离子弧温度场检测的研究现状

在等离子弧温度场检测的研究中,通常有接触法和非接触法2种。

接触法检测等离子弧温度场是一种极其普遍的方

收稿日期:2015-01-04;修回日期:2015-03-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51275283);上海市科委基础研究重点资助项目(14JC1402700);上海工程技术大学研究生科研创新项目(14KY0516)

作者简介:王晓霞(1990),女,上海人,硕士研究生,主要研究方向为等离子弧焊电弧流场。E-mail:wxx\_9008@126.com

法,但有许多不足。首先由于等离子弧温度极高,检测仪器探头的寿命无法保证;其次由于接触法会直接接触到等离子体,破坏了电弧的完整性,造成检测结果有很大的误差。而非接触法则解决了以上问题,不仅提高了探头的寿命,降低了成本,而且提高了检测结果的准确性。

非接触法分为辐射测温法和光学干涉测量法。辐射测温法又包括光谱诊断法、亮度温度法、比色温度法、红外测温法等。后3种方法主要运用于焊接熔池的温度场测量。而光谱诊断法则广泛应用于电弧温度场的测量,拥有诸多优点:①获取的信息量较为丰富;②灵敏度高,选择性好;③可进行立体检测;④无干扰性,不会破坏被测物体的完整性。

在20世纪50年代期间,德国物理学家Maecker<sup>[3]</sup>, Finkelberg<sup>[4]</sup>等在对电弧等离子体的诊断中采用了定量光谱法,并且借用了天体物理光谱测量方法,即从离子谱线的强度上推断几种形式电弧的温度范围。

20世纪60年代的后期,对焊接电弧温度场的测定大多数采用光谱诊断法,主要包括:谱线绝对强度法、标准温度法和谱线相对强度法(Boltzmann作图法)等。

K Hiraoka等<sup>[5]</sup>利用以上3种方法分别对纯氩氛围下的TIG电弧和氩-氢混合气体TIG(钨极氩弧焊)电弧进行光谱诊断。结果表明在纯氩氛围下的径向等离子体温度分布一致,而在氩-氢混合气体下的等离子体温度分布存在很大差异。M F Thornton<sup>[6]</sup>利用标准温度法测温理论测量电弧温度场,发现选择不同的谱线其计算结果有很大差别。

Boltzmann作图法测量温度较谱线绝对强度法、标准温度法等测量方法更为方便。我国学者杨运强等<sup>[7]</sup>和斯红等<sup>[8]</sup>基于Boltzmann作图法原理,即通过测量2条谱线或多条谱线的相对值求得等离子体温度的测量方法,对电弧进行实时的空间扫描,分析了谱线选取的原则,测量计算出电弧等离子体的温度场分布。

光谱诊断法较其他非接触法的稳定性要更好,成为目前研究电弧特性最为常用和成熟的一种方法。但光谱诊断法被限定在局部热力平衡的条件下,测量结果的差别表现在阴极区,尽管采用了很多方法进行检测,还是没有找到统一的结果。该方法获得的光谱强度都是积分值,需要用Abel逆变换来计算温度场。而积分奇异点的存在,导致了计算结果的精度不高,在这方面还需更进一步地研究与分析。

与光谱诊断法的实验设备相比,采用光学干涉法有很多优点,其中包括所得到的结果较为精确、计算量小、设备也更加简单,并且能一次得到全场信息等。我国学者李俊岳<sup>[9]</sup>对单波长脉冲激光全息干涉法诊断电弧原理,提出了全息干涉图的解析方法。之后杨士勤<sup>[10]</sup>运用此干涉技术,分别采用不同的电流,包括恒定电流以及高频脉冲电流,对微束等离子电弧温度场进行了检测。其结果表明这2种不同的电流得到的结果有很大的差别,在高频脉冲电流的情况下所得到的电弧中心温度更高,电弧半径小,电弧锥度也较小,具有明显的收缩效应。因此在等离子弧焊接过程中的不稳定性可以通过脉冲等离子弧焊来解决。但是在干涉法检测电弧温度场时,对于光学装置的稳定性要求很高,稍有一点偏差,所得到的结果就会出现很大的差异,这对我们的研究又造成了一定的困难。

综上所述,接触法与非接触法相比,接触法不仅不能获得精确的温度场结果,而且由于等离子体的温度很高,其设备仪器的寿命也很短<sup>[11]</sup>,这对研究工作产生了很大的影响;而非接触法解决了仪器寿命的问题。在诸多方法中,光谱法与干涉法运用广泛,但是也有各自的缺点。如何能解决光谱法检测出来的光谱强度中的积分奇异点以及如何提高干涉法中光学装置的稳定性是未来研究的重点。

## 1.2 等离子弧温度场计算的研究现状

由于等离子体的温度条件非常极端,对电弧温度场的测定极其困难,为了解决这一难题,在20世纪30年代,学者们通过求解数学物理方程的解析法来计算等离子弧温度场。随着时代的进步,计算机软件的开发,开始采用有限元等数值模拟方法来得到等离子弧的温度场。

早期Elenbass和Heller运用解数学物理方程的解析方法,为了得到弧柱内部的温度场分布,建立了电弧能量平衡方程以及电弧半径、电场强度和弧电流等参数之间的关系,得到了Hlenbass-Heller能量平衡方程<sup>[12-13]</sup>。但由于此方程是二阶非线性方程,电导率、导热系数与温度的非线性关系强,因此解此类方程几乎是不可能的,只能采用数值解和近似解的方法才能得到电弧的温度场分布。该方法有一定的局限性,也很少被后人使用,但是他们为弧柱物理的发展奠定了理论基础。

20世纪60年代,数值模拟技术开始发展起来。罗杰等<sup>[14]</sup>对大功率等离子体的温度场进行了有限元数值模拟。结果表明靠近阴极尖端部分电流密度较

大,等离子体温度也较高。这是因为电流密度与电导率有着密切的关系,而电导率则是影响温度的一个重要因素,因此电流密度与温度之间存在着一定的线性关系。模拟的结果与理论计算相吻合。芦凤桂<sup>[15]</sup>、王健<sup>[16]</sup>、殷凤良<sup>[17]</sup>等人均建立了三维焊接电弧数学模型,研究了电弧温度场分布,研究结果表明在阴极与阳极之间有很大的温度梯度,靠近阴极附近出现了电弧最高温,随着离阴极距离越来越远,电弧温度也逐渐减小。

对于等离子体温度场的计算,运用数理解析的方法,计算繁琐,工作量大,很难计算出结果。因此现今更多的学者采用数值模拟,计算出的结果不论是二维电弧模型还是三维电弧模型,得到的温度场分布都是越靠近阴极区电弧温度越高。说明数值模拟在这2种情况下得到的结果是一致的。

## 2 等离子弧流场的研究

对等离子弧流场的研究同样从检测以及计算这2个方面进行研究。

### 2.1 等离子弧流场检测的研究现状

对于电弧流场的检测国内学者采用光学技术实现电弧动态图像采集,主要的方法是粒子成像测速技术 (particle image velocimetry, PIV)。

粒子成像测速技术是在流动显示技术和图像处理技术的基础上发展起来的一种非接触式流场测量技术。PIV技术有很多优点:首先它是一种非接触式测量,因此不需要将测量传感器放入流场中就能很好地测量出结果;其次利用PIV技术能瞬间测量某个时间的面或者流场;最后它的测量精度高,测速的范围大。因此PIV技术非常适用于等离子弧流场的检测。董华军等<sup>[18]</sup>采用PIV技术对短间隙真空开关电弧进行了实验研究,观察分析了电弧流场的信息,当电弧电流增大到一定值时,有明显的漩涡区。

学者们对于粒子成像测速技术的研究甚少,但其独有的特点不仅能测试流场瞬时流动的特性,还能测试与时间相关的流动特性。这对等离子弧流场的检测有很大的帮助。但是PIV技术的图像处理速度很慢,需要进一步的研究与探讨。

### 2.2 等离子弧流场计算的研究现状

由于等离子体在焊接电弧中的高速流动性,等离子体电弧流场分布很难在实验中检测得到,学者们开始研究新的方法。早期计算电弧的速度场的方法主要是数理解析法。到了20世纪80年代,随着计算流体力学的发展,有限元数值分析的方法成为一种经济有

效的研究手段<sup>[19]</sup>。

Maecker运用求解数学物理方程的解析方法,在假设电弧为无黏性的理想流体条件下仅根据轴向动量方程计算了阴极下方电弧的最大流动速度。Strachan等<sup>[20]</sup>也采用该求解方法,利用电场、电弧半径以及辐射损失等一些试验数据,根据能量平衡方程计算出等离子电弧的平均速度。这些计算只考虑了能量方程和动量方程中的一种,但是等离子电弧是带电的流体,因此不考虑质量守恒、动量守恒以及能量守恒方程直接用能量方程或动量方程计算得出的流体速度存在很大的误差。

用求解数学物理方程的解析方法来计算等离子弧的温度场其过程非常繁琐,需要大量的求解时间。因此学者们纷纷采用数值模拟的方法对等离子弧的流场进行研究。等离子电弧流场的有限元分析涉及磁流体动力学,因此就必须根据流体守恒控制方程组包括质量守恒、动量守恒、能量守恒定律以及麦克斯韦方程组来进行模拟分析<sup>[21]</sup>。由于等离子弧焊与TIG相似,所以在TIG焊电弧模型的基础上,设置合适的边界条件,应用磁流体动力学方程构建数学模型,对等离子焊接电弧的数值模拟具有一定的指导作用<sup>[22]</sup>。我国学者芦凤桂<sup>[23]</sup>、雷玉成<sup>[24]</sup>等均采用有限元法对TIG焊电弧的流场进行了深入的研究。McKelliget<sup>[25]</sup>、Chang C H<sup>[26]</sup>、Huang P C<sup>[27]</sup>和Westhoff R<sup>[28]</sup>等人建立了二维等离子电弧模型,所采用的模型假设电弧处于湍流状态,对等离子电弧的流场进行了分析。研究表明电磁力对电弧的速度分布有非常重要的影响。

在前人研究的基础上,利用有限元法对二维电弧流场分布的数值模拟较为成熟。K C Hsu等<sup>[29]</sup>人利用了有限差分法原理对不同电流、不同弧长下的自由燃烧电弧进行模拟,得到了等离子气流动速度、电压、电场强度等其他电弧特性。K C Hsu等将电弧行为用数学的形式精确地描述出来,这为后面的研究带来了很大的便利,得到的结果也更合理。而计算区域的划分方式也一直被后来的学者所采用。K C Hsu等还利用有限差分法对自由燃烧的氩气保护的TIG焊接电弧进行了研究。由于TIG电弧缺少等离子电弧的机械压缩作用,所以TIG焊等离子体的流速要比等离子弧焊的等离子体流速低得多。但有限元法在差分网格划分和节点计算准确性上有一定的缺陷,因此它的使用有很大的局限性。

近几十年来,对等离子弧流场的研究更多集中在三维电弧模型上<sup>[30]</sup>。殷凤良<sup>[31]</sup>、王健<sup>[32]</sup>等人建立了

等离子弧焊静止电弧的三维有限元数学模型,运用有限体积法进行了数值模拟,并将其模拟出来的结果与 TIG 焊模拟出的结果<sup>[33]</sup>进行了比较。结果表明,在相同的参数条件下,等离子弧焊与 TIG 焊相比,电弧弧柱温度有显著的提高,等离子体的流动速度与电弧压力也有了明显的增大。这是因为等离子弧焊中喷嘴对电弧起到了压缩作用,使电弧的电流密度增大从而影响了电弧的温度场。电弧的有限元模型如图 1 所示。

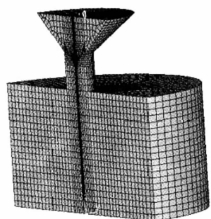


图 1 电弧有限元模型

Figure 1 Finite element model of arc

电弧等离子体流场的计算采用数值模拟计算的方法,随着计算机软件的开发,计算的结果更加准确,是一个非常经济的手段。

### 3 结语

从 20 世纪开始,国内外学者对等离子弧温度场和流场进行了深入的研究。在等离子弧温度场检测方面,光谱诊断法检测所得到的结果较其他检测方法更精确,但考虑到等离子体温度的极端性,目前学者们更多的采用数值模拟的方法计算等离子弧温度场。在等离子弧流场方面,PIV 技术对于等离子弧的检测有一定的帮助,但是其处理图像的速度很慢,运用此技术来检测等离子弧温度场还很少,有待进一步的研究。在近几十年间,更多的是采用数值模拟的方法对等离子弧流场分布进行研究。有限差分法在差分网格划分和节点计算准确性上有一定的缺陷,因此它的使用有很大的局限性。而有限体积法较有限元法在计算时间上更快,是近年来运用最广泛的一种计算等离子弧流场分布的数值模拟方法。

### 参考文献:

- [1] WU C S, WANG L, REN W J, et al. Plasma arc welding: process, sensing, control and modeling [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2014, 16(1): 74 - 85.
- [2] LANCASTER J F. The physics of welding [J]. *Physics in Technology*, 1984, 15: 73 - 79.
- [3] 李俊岳,刘金合,廉金瑞,等. 电弧等离子体的单波长脉冲激光全息诊断[J]. *焊接学报*, 1984, 5(3): 132 - 144.
- [4] 杨士勤,阎永春,王小峰,等. 高频脉冲微束等离子电弧温度场的测试及分析[J]. *材料科学与工艺*, 1995, 3(2): 106 - 110.
- [5] MAECKER H, PETERS T, SCHEN K H. Ionen- und atomquerschnitte in plasma verschiedener gase [J]. *Zeitschrift für Physik*, 1955, 140(2): 119 - 138.
- [6] FINKELBERG W. *Handbuch der Physik* [J]. Berlin: Springer-Verlag, 1956.
- [7] HIRAOKA K, SHIWAKU T, OHJI T. Determining temperature distributions of gas tungsten arc (TIG) plasma by spectroscopic methods [J]. *Physics*, 1997, 11(9): 688 - 696.
- [8] THORNTON M F. Spectroscopic determination of temperature distribution for a TIG-arc [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1993, 26(9): 1432.
- [9] 杨运强,宋永伦,李俊岳. 铝焊接电弧物理特性的研究[J]. *湘潭大学自然科学学报*, 1995, 27(2): 107 - 110.
- [10] 斯红,华学明,张旺,等. 基于 Boltzmann 光谱法的焊接电弧温度场测量计算[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(9): 2311 - 2313.
- [11] 朱兆明. 等离子体弧变厚度切割工艺参数控制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 12 - 14.
- [12] 易挺. 短电弧加工工具电极损耗及补偿方法的研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2009: 8 - 13.
- [13] 陈球武,胡特生,徐有涛. 焊接电弧形态和电弧温度场[J]. *北京航空学院学报*, 1986, 12(3): 7 - 16.
- [14] 罗杰,何煜. 大气压下大功率等离子体炬的数值模拟[J]. *核技术*, 1999, 22(8): 488 - 492.
- [15] 芦凤桂,唐新华,李少青,等. 定点 TIG 焊接电弧与熔池交互耦合数值模拟[J]. *焊接学报*, 2005, 26(9): 78 - 81.
- [16] 王健,雷玉成,朱彬. 等离子焊接电弧流场数值分析[J]. *焊接*, 2008(2): 27 - 31.
- [17] 殷凤良,胡绳荪,郑振太,等. 等离子体电弧数值模拟[J]. *焊接学报*, 2006, 27(8): 51 - 54.
- [18] 董华军,康凯,郭方准,等. 基于 PIV 技术真空开关电弧流场实验研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2014, 34(6): 590 - 592.
- [19] 李明. TIG 等离子焊接气体保护效果数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011: 43 - 46.
- [20] STRACHAN D C, BARRAULT M R. Axial velocity variations in high-current free-burning arcs [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2001, 9(3): 435.
- [21] HSU K C, ETEMADI K, PFENDER E. Study of the free-burning high-burning high-intensity argon arc [J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54(3): 1293 - 1299.
- [22] 马立,胡绳荪,殷凤良,等. 等离子弧焊接过程数值模拟的现状与发展[J]. *焊接*, 2005(8): 8 - 10.
- [23] 芦凤桂,姚舜,楼松年,等. 熔池表面变形对电弧行为特征的影响[J]. *焊接学报*, 2004, 25(2): 57 - 60.
- [24] 雷玉成,李彩辉,郁雯霞,等. 氦氩气体保护 TIG 焊接电弧数值分析[J]. *焊接学报*, 2006, 27(11): 25 - 28.
- [25] MCKELLIGET J, SZEKELY J, VARDELLE M, et al. Temperature and velocity fields in a gas stream exiting a plasma torch; a mathematical model and its experimental verification [J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1982, 2(3): 317 - 332.
- [26] CHANG C H, RAMSHAW J D. Numerical simulations of argon

- plasma jets flowing into cold air[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1993, 13(2):189-209.
- [27] HUANG P C, HEBERLEIN J, PFENDER E. A two-fluid model of turbulence for a thermal plasma jet [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1995, 15(1):25-46.
- [28] WESTHOFF R, SZEKELY J. A model of fluid heat flow and electromagnetic phenomena in a nontransferred arc plasma torch[J]. Journal of Applied Physics, 1991, 70(7):3455-3466.
- [29] HSU K C, ETEMADI K, PFENDER E. Study of the free-burning high-intensity argon arc [J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(3):1293-1299.
- [30] 李志刚. 等离子体弧图像采集及温度场研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007:23-32.
- [31] 王健. 等离子弧焊接电弧特性的模拟研究[D]. 镇江:江苏大学, 2007:20-35.
- [32] 殷凤良. 等离子弧焊接过程的数值模拟[D]. 天津:天津大学, 2007:30-44.
- [33] 芦凤桂, 唐新华, 李少青, 等. TIG 焊接电弧与熔池统一模型有限元分析[J]. 机械工程材料, 2006, 30(3):31-34.

## 2016 年《杭州化工》征订启事

《杭州化工》杂志是经国家科技部和国家新闻出版总署批准在国内公开发行的化工科技类学术期刊,由杭州市化工研究所和杭州市化工学会联合主办。国内统一刊号:CN 33-1199/TQ;国际标准刊号 ISSN 1007-2217。是《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国期刊全文数据库(CJFD)》、《中文科技期刊数据库》和《美国化学文摘社》收录期刊。

《杭州化工》设专题综述、科学研究、技术应用及国内外化工信息等栏目。主要报导全国化工领域最新科研成果,探讨化工行业新产品、新工艺、新技术的研究及应用动态,并选登部分译文。读者对象为化工及相关领域从事科研、设计、生产及技术管理等相关人员。热诚欢迎全国化工领域从事教学、科研、开发、生产和应用的各界人士订阅。

本刊为季刊,每期 7.5 元,全年订价 30.00 元,需订购者可直接汇款至本刊编辑部,订购时请说明订份数、单位名称和详细地址以及收件人姓名。

联系地址:浙江省杭州市湖墅石灰坝 7 号《杭州化工》编辑部 邮编:310014

电话:0571-88314437 88313782-2217 传真:0571-88314437 E-mail:hzchemj@163.com

## 《液压气动与密封》2016 年征订启事

《液压气动与密封》杂志(刊号 CN 11-4839/TH)是由中国液压气动密封件工业协会主办的技术性期刊,国内外公开发行,是“中国科技核心期刊”。杂志报道国内外最新的液压、液力、气动与密封技术及其应用;读者群体为液压、液力、气动、密封等流体动力产业及相关主机产业的工程技术人员、管理人员、销售采购人员、安装调试和使用维修人员,以及有关大专院校的师生。

月刊,大 16 开,每册定价 12.00 元,全年 144.00 元。

邮局订阅(邮发代号 82-152),也可直接向本编辑部邮购(另加邮费 2 元/本)。

开户银行:中国工商银行北京礼士路支行 帐号:0200003609201121540

户名:《液压气动与密封》杂志社 地址:北京市西城区三里河路 46 号

电话:010-68594900 邮编:100823 邮箱:chpsa-fx@mei.net.cn

欢迎订阅 ● 欢迎刊登广告 ● 欢迎赐稿