

文章编号: 1673-5196(2008)05-0014-05

TIG 电弧弧柱机制的静电探针分析

朱亮^{1,2}, 田玉吉², 李渊博², 郑韶先²

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 利用自行研制的运动铜丝静电探针, 对 TIG 电弧进行低扰动诊断, 测量弧柱区不同位置的电位. 结合静电探针与等离子体相互作用机理分析电位波形的形成机制. 研究发现, 当探针位于电弧的中央区域时, 探针与载流等离子体和非载流等离子体发生交替接触, 使探针上的电位呈负电位和零电位交替变化. 据此提出摆动载流通道 TIG 电弧模型. 在电极的阴极斑点和工件的阳极斑点之间, 形成一种直径小于弧柱的载流通道, 它以数百赫兹的频率, 在电弧内部温度较高的等离子区旋转和摆动, 承担所有的电弧电流. 而在载流通道没有运动到的外围温度区域, 则呈现温度较低的负离子区.

关键词: 静电探针; TIG 电弧; 载流通道

中图分类号: TG444 **文献标识码:** A

Analysis of arc-column mechanism of TIG arc with electrostatic probe

ZHU Liang^{1,2}, TIAN Yu-ji², LI Yuan-bo², ZHENG Shao-xian²

(1. State Key Lab. of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. College of Materials Science and Engineering, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: A movable electrostatic probe of copper wire was developed for low-disturbing diagnosis of TIG arc. The potentials of the arc column in various probed positions were measured on the basis of the mechanism of interaction between electrostatic probe and plasma, the formation mechanism of probed potential waveform in plasma was analyzed. It was found by the investigation that, when the electrostatic probe located at the center area of the arc, the probe contacted alternately with the current carrying plasma and non-current-carrying plasma, thereby the potential on the probe changed between negative and zero levels. Thus, a model of oscillating current-carrying channel was presented for the TIG arc. A kind of current carrying channels with diameters less than those of arc column formed between the cathode spots and anode spots in the workpiece and they would rotate and oscillate with a frequency of hundreds hertz in the plasma region to form higher temperature and bear all the arc current. However, in the outer region where the current carrying channels did not reach, there would be a negative ion region with lower temperature.

Key words: electrostatic probe; TIG arc; current carrying channel

非熔化极电弧在工程中有着重要的用途. 为了满足不同工艺的需要, 人们研究了对电弧特性改善的许多种方法. 例如, 使用各种不同种类和配比的混合气或采用双层气流保护法^[1]; 焊剂带约束电弧超窄间隙焊接法^[2]; 将活性助焊剂涂敷在工件表面的 TIG 焊(A-TIG)法^[3]. 由此可见要建立其统一的作用机制, 必须对电弧的物理机理有进一步认识. 很多

的研究从理论上建立焊接电弧模型, 描述电弧的温度场、电磁场和流动场, 将电弧区看作是一个局部热平衡区(LTE), 而该区具有层流特性, 据此建立了质量守恒、能量守恒、电流连续、Maxwell 等一系列方程, 并利用数值差分方法或有限元法求解^[4]. 但这些电弧计算模型都无法考虑电弧的内部结构, 计算模拟与实际物理模型有一定的差别^[5]. 人们曾经使用光谱诊断实验方法从电弧的热辐射方面认识了电弧行为, 但一般都是测量某一个体积中参数的平均值^[6]. 探针技术是用来测量等离子体特性的一种诊断工具, 可以从探针的伏安特性曲线中计算出等离

收稿日期: 2008-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(50775150)

作者简介: 朱亮(1964-), 男, 甘肃高台人, 教授, 博导.

子体的电子温度、密度、空间电位和悬浮电位等重要参数^[7],其结构简单、成本低廉、测量结果既有相当的时间分辨又有较高的空间分辨.本文设计了一种新的静电探针,对非熔化极电弧进行诊断,测量探针在电弧中不同位置处的悬浮电位,分析其波形的形成机理,认识电弧的内部结构,进而提出一种新的电弧物理模型.

1 试验方法

试验系统主要由钨极氩弧电焊机、静电探针的定位及驱动装置以及测量仪器组成.如图1所示.钨电极接电源的负极,在钢试板和钨电极之间形成电弧.马达驱动导向轮旋转,同时带动缠绕在导向轮上的环形铜丝探针运动,其线速度为1.5 m/s.在电弧的某一轴向横截面上,探针以确定的距离垂直穿过电弧中心线所在的平面.电弧沿探针方向水平移动,导电柱与探针接触,用来传导探针上的电位,导电柱同时与采样电阻连接以减小探针对接电弧的影响.为保证导电柱与探针电接触的可靠性,通过金属弹簧片的作用及调节导电柱的位置,使金属丝产生足够的张力,保证金属丝与导电柱之间有一定的接触压力,其导电的可靠性已通过试验得到验证.

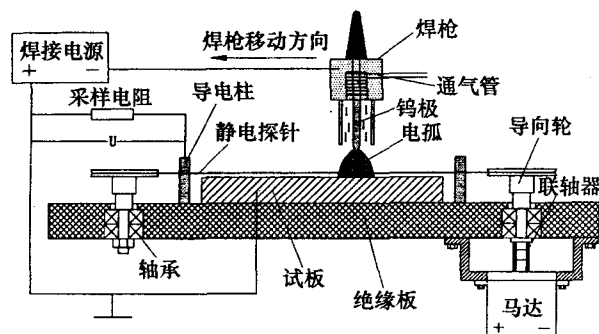


图1 实验装置

Fig.1 Experimental setup

静电探针通常都采用高熔点的金属材料制作,如钨或钼.在carlo Fanara^[8,9]的工作中采用铜丝制作探针,研究了TIG电弧的特性,取得了良好的效果.在本文的工作中,考虑到铜丝的良好加工性能,以及优良的导热导电特性,故选用 $\phi 0.2$ mm的铜丝作为探针.

常规的静电探针,除端点的工作部分外,其余部分都套着陶瓷或玻璃绝缘套作为探针的支撑物,但在大多数情况下,支撑物的表面面积大于探针本身许多倍,对等离子体会产生较大的扰动,因此,支撑物的存在总会不可避免地引入误差^[10].而本文设计的这种静电探针测量方法,可以最大限度地减小对

电弧的扰动.

实验中,使用电弧电流为80 A,电弧弧长为4 mm.以试板为参考点,选择电弧的不同位置放置探针,用Tektronix的TDS3P52B型数字示波器对探针的电位进行采集.

2 探针上的电位波形特征

在离试板表面 $h=1.8$ mm处的电弧横截面内,距电弧中心线的距离 d 由小变大时,测量得到的探针上的电位波形如图2所示.当探针距离电弧中心 $d<4$ mm时,电位在零电位和负电位之间波动,波动频率约为100~600 Hz;当探针处于电弧的边缘区域时,探针上的电位幅值减小,波动幅度也减小,不出现零电位.图3是在离试板表面 $h=2.5$ mm处的电弧横截面内,距电弧中心线不同距离 d 时,所得到探针上的电位波形,其波形的变化特征与图2所示的相似,只是电位波形中不出现零电位时,所对应的探针到电弧中心的距离减小为 $d=3$ mm.

静电探针理论相当复杂,但简单条件下,可以从探针的伏安特性曲线计算出等离子体的电子温度、密度、空间电位和悬浮电位等重要参数^[11].

在探针测量电路中,通过一个60 k Ω 的采样电阻将探针和工件连接.采用较大阻值的采样电阻,使流过探针的电流尽量小,以减小探针对接电弧的影响^[8].这样,探针上施加的电位为恒定的零电位,在这种情况下,探针的电位高于等离子体的电位,此时全部正离子都受鞘层拒斥场的作用不能到达探针表面,只有电子被探针收集.这种探针所能收集到的最大电子电流密度,称为饱和电子电流密度.图2和图3中的探针电位波形,实际上是流过探针的电流在采样电阻上产生的电压.

在垂直于电弧轴向的截面上,探针从距电弧中心轴不同的位置由近及远变化时,探针上的电位波形有如下变化规律:在离电弧中心轴较近时,探针上的电位波动较大,电位峰值变化较小.一个显著特征是探针上的电位要瞬间由较大负电位变为零电位.当探针离开电弧中心一定距离时,电位的峰值变小,电位的波动幅度变小,不再出现零电位.

当探针位于电弧的中央区域时,探针上接收到导电等离子体中的电子,从而瞬间得到幅值较大的负电位,这是容易理解的,但为什么探针上的电位瞬间又能变为零电位,值得深入分析.探针上的电位要瞬间由较大负电位变为零电位,只能是探针上接收到正粒子,而在探针上施加的电位保持不变的情况下,只能是等离子体的电位发生改变.这有2种可能:一

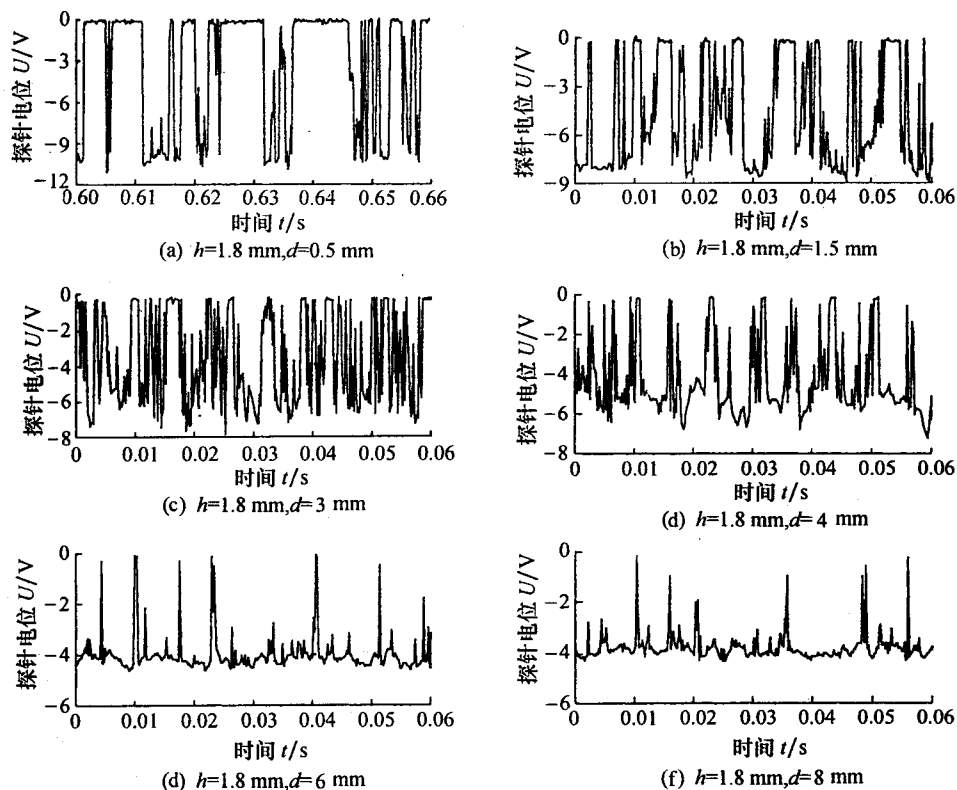


图2 探针在距试板表面1.8 mm处电弧截面处电位波形

Fig. 2 Probed potential waveforms on the arc column section with probe located at 1.8 mm from surface of tested plate

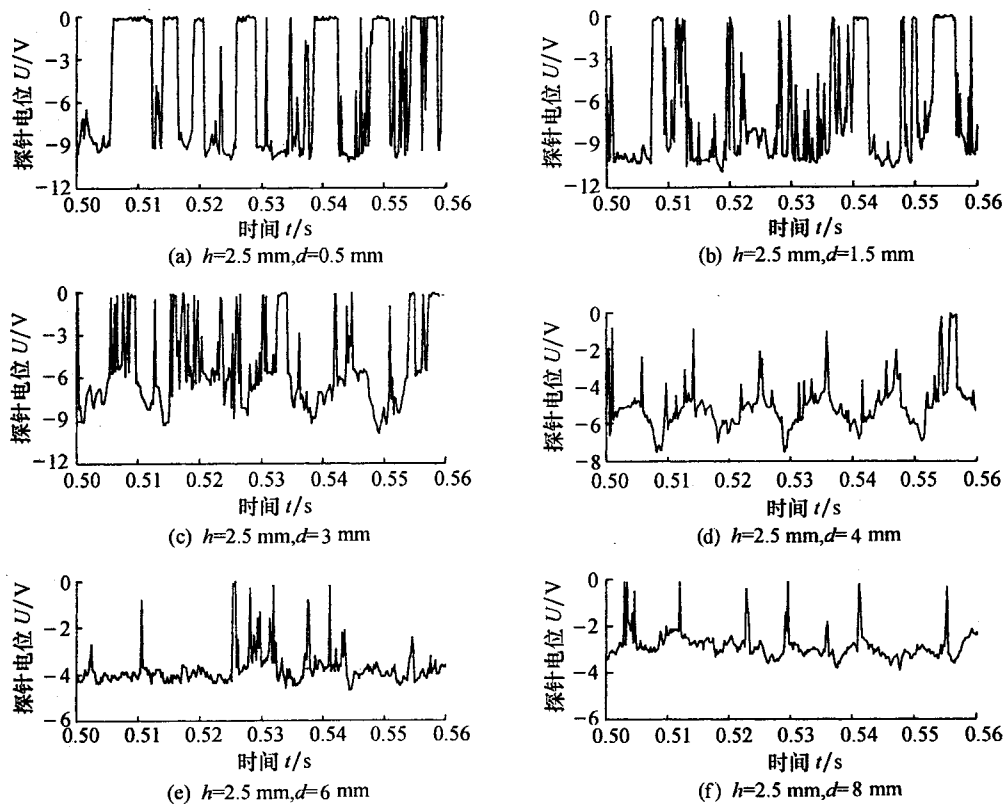


图3 探针在距试板表面2.5 mm处电弧截面处电位波形

Fig. 3 Probed potential waveforms on the arc column section with probe located at 2.5 mm from surface of tested plate

是电弧瞬时的电位高于探针的电位;二是探针瞬时与导电的等离子体没有相互作用,也就是说探针瞬时处于悬浮状态. 由于电弧中电位最高的点是接电源正极的工件,电弧中任何一点的电位都不可能高于工件,可见,第一种可能在电弧中不可能发生. 所以,探针上的瞬间电位为零的根本原因是探针与导电的等离子体没有发生相互作用所致.

当探针位于电弧的边缘区域时,这个区域温度已变得很低,已没有导电的等离子体,却存在吸附了电子的原子及分子,这样该区域中存在着一一定量的负离子. 探针将吸附这些负离子而呈现相对稳定的负电位.

综合以上的分析,可以对探针在电弧中不同位置电位波形的形成机理作以下概括:探针位于电弧的中心区域时,探针与导电的等离子体发生不连续的接触. 当探针与导电等离子体瞬间接触时,处于高电位的探针收集电子形成饱和电子电流,探针上检测到负电位,如图 4a 所示. 当探针与非导电等离子体瞬间接触时,探针同时收集电子和正离子,使流过探针的电流为零,探针上的电位与工件上的电位相同,即为零电位,如图 4b 所示. 当探针位于电弧的边缘区域时,探针上将吸附这些负离子而呈现相对稳定的负电位,如图 4c 所示.

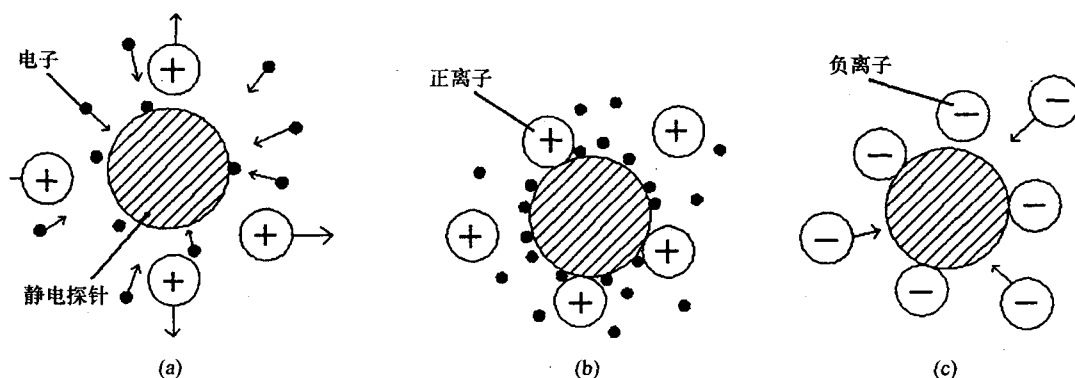


图 4 静电探针与等离子体的相互作用

Fig. 4 Interaction mechanism of electrostatic probe with plasma

3 摆动载流通道电弧模型

基于以上 TIG 电弧中静电探针的诊断结果,结合等离子体中带电粒子与金属探针的相互作用,以及对探针在电弧中不同位置的电位波形的形成机理的理解,本文提出以下的电弧模型:如图 5 所示,对于轴对称的 TIG 电弧,可分为 2 个不同的区域,中心温度较高的等离子区,以及外围温度较低的负离子区. 电极的阴极斑点和工件的阳极斑点之间形

成一种载流通道,其直径远小于通常观测到的弧柱直径. 而这种载流通道有时只有一根,电弧电流增大时有数根共存,以数百赫兹的频率,在电弧的中心等离子区作空间旋转和摆动,载流通道承担所有的电弧电流. 工件上的极性斑点也随着高速移动,其移动范围决定着电弧加热区的尺寸. 该电弧模型与常规电弧模型的显著区别在于该模型电弧的等离子区是由较细的载流通道的摆动所形成的,可称之为摆动载流通道电弧模型.

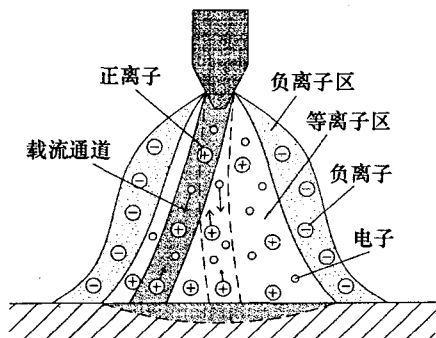


图 5 电弧的摆动载流通道模型

Fig. 5 Model of oscillating current-carrying channel of TIG arc

利用摆动载流通道电弧模型,很容易解释图 2 和图 3 中探针上的电位波形的变化. 当探针位于电弧的中心区域时,由于载流通道以较高的频率摆动,瞬间将与探针接触,处于高电位的探针上接收到低电位导电等离子体中的电子,瞬间得到幅值较大的负电位. 如果载流通道摆动至脱离探针的位置,探针周围的等离子体不像载流通道中的等离子体那样有低电位,此时的电子靠热运动与探针碰撞,探针表面会出现净的负电荷,该负电荷产生的电场排斥电子而吸引正离子,当这个过程平衡时,单位时间内进入探针表面的电子数与离子数相等,这时流过探针电流为零,使探针上的电位为零,其机理类似于前面分析的

探针处于悬浮状态的情况.

4 结论

设计了一种新的运动铜丝静电探针,对非熔化极电弧进行诊断,测量了弧柱区不同位置的电位,分析了电弧的内部结构.结果表明,当探针位于电弧的中心区域时,探针与传送电流的等离子体和非传送电流的等离子体发生交替接触,探针上的电位呈负电位和零电位交替变化的形式.当探针位于电弧的边缘区域时,探针上将吸附这些负离子而呈现相对稳定的负电位.提出摆动载流通道非熔化极电弧模型.电极的阴极斑点和工件的阳极斑点之间,形成一种直径小于弧柱的载流通道,它以数百赫兹的频率,在电弧内部温度较高的等离子体区空间旋转和摆动,载流通道承担所有的电弧电流,而在载流通道没有运动到的外围温度区域,呈现温度较低的负离子区.

参考文献:

- [1] TANAKA M, TASHIOR S, USHIO M. CO₂-shielded arc as a high-intensity heat source [J]. *Vacuum*, 2006, 80(11-12): 1 195-1 198.
- [2] 朱 亮, 张旭磊, 郑韶先, 等. 焊剂带约束电弧超窄间隙焊接的实现 [J]. *兰州理工大学学报*, 2007, 33(3): 27-30.
- [3] 刘凤尧, 林三宝, 杨春利, 等. 活性剂对焊缝成形的影响 [J]. *焊接学报*, 2002, 23(1): 1-4.
- [4] CHEN X, LI H P. Heat transfer and fluid flow in a high intensity free burning arc [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44(13): 2 541-2 553.
- [5] QUINN T P, SZANTO M, GILAD I. Coupled arc and droplet model of GMAW [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, 10(1): 113-119.
- [6] 牛田野, 曹金祥, 刘 磊, 等. 低温氦等离子体中的单探针和发射光谱诊断技术 [J]. *物理学报*, 2007, 56(4): 2 330-2 336.
- [7] AUCIELLO O, FLAMM D L. 等离子体诊断 [M]. 郑少白译. 北京: 电子工业出版社, 1994.
- [8] FANARA C. Sweeping electrostatic probes in atmospheric pressure arc plasmas-part I: general observations and characteristic curves [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(3): 1 072-1 081.
- [9] FANARA C. Sweeping electrostatic probes in atmospheric pressure arc plasmas-part II: temperature determination [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(3): 1 082-1 092.
- [10] LOWKE J J, TANAKA M, USHIO M. Mechanisms giving increased weld depth due to a flux [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38(18): 3 430-3 445.
- [11] KLAJN A. Langmuir probes in switching vacuum arc measurements [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2005, 33(5): 1 611-1 617.