

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2010.05.016

水冷铜阳极法测量阳极等离子电弧力径向分布*

朱 胜¹, 任智强¹, 殷凤良¹, 胡绳荪²

(1. 装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072; 2. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 设计了一套水冷铜阳极装置, 用压力传感器测量等离子弧焊阳极电弧力的径向分布情况, 研究了焊接电流、离子气流量和弧长对阳极电弧力的影响规律。结果表明, 阳极电弧力在电弧中心最大, 随径向距离的增大而迅速减小, 电弧力作用半径可以认为等于约束喷嘴出口半径; 随焊接电流和离子气流量的增大阳极电弧力显著增大, 电弧力作用半径变化不大; 而弧长对阳极电弧力的影响不大; 测量结果表明, 等离子弧焊电弧力传统经验公式忽略电流对电弧力的影响是有一定缺陷的。

关键词: 等离子弧焊; 电弧力; 水冷铜阳极; 电流

中图分类号: TG156.88; TB114.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2010)05-0082-04

Measurement of Radial Distribution of Plasma Arc Anode Pressure by Water-cooled Copper Anode Method

ZHU Sheng¹, REN Zhi-qiang¹, YIN Feng-liang¹, HU Sheng-sun²

(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072; 2. Academy of materials science and engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

Abstract: In the present paper, a water-cooled copper anode was designed. The radial distribution of plasma arc anode pressure was measured by using pressure transducer. The influence of welding current, ionized gas feed rate and arc length on anode arc pressure was studied. Results show that the maximum of anode arc pressure appears in the center of electric arc, which decreases rapidly with the increase of radial distance. It is considered that the arc pressure radius approximates the radius of restraint muzzle. The arc pressure increases with the increasing welding arc and ionized gas feed rate. The variation of its action radius is not obvious, as well as the influence of arc length on the arc pressure. There is a little difference between the measuring results and the traditional empirical formula. The influence of current flow on the arc pressure can not be reflected by the empirical formula.

Key words: plasma arc welding; arc pressure; water-cooled copper anode; electric current

0 引 言

等离子弧焊的优势表现在它对工件的强穿透性上, 这主要是通过等离子电弧对工件的热和力的共同作用来实现。其中作用在阳极工件上的等离子电弧力使熔池产生很大的下凹, 在电弧力足够大时可以形成小孔效应, 从而加速了热向工件的传输。在小孔型等离子弧焊中, 小孔在电弧力、重力和表面张力的共同作用下保持平衡。可见, 等离子电弧

力对等离子弧焊工艺是非常重要的, 研究阳极工件处的电弧力分布和焊接参数对其影响是非常有意义的。文献^[1]最早测量了电弧力, 国内许多焊接工作者也对阳极等离子电弧力进行了研究^[2-4], 但大都只对电弧力的最大值进行了测量。文中采用水冷铜阳极法用压力传感器测量了等离子弧焊阳极电弧力的径向分布。

1 阳极电弧力的形成

阳极等离子电弧力主要包括等离子流力和电磁力, 还有阳极材料蒸发时产生的反作用力。等离

收稿日期: 2010-04-27; 修回日期: 2010-08-25

基金项目: *国家自然科学基金项目资助 (50975286)

作者简介: 朱胜(1964—), 男(汉), 北京人, 教授, 博士生导师。

子电弧由于约束喷嘴的约束作用,等离子体的流速很大,高速流动的等离子束流到达工件表面时,对工件产生强有力的冲击力。等离子电弧内电流流动时产生磁场,磁场反过来又对电流产生由外指向电弧内部的电磁力作用,这就是自磁收缩效应。电弧内产生较大压强以平衡电磁力作用,而流体内的压力是等方向传递的,这样对阳极工件也就产生一个作用力。由阳极材料蒸发时产生的反作用力较小,在计算电弧力时可以忽略。

焊接工作者给出了阳极等离子电弧力的经验表达式,如下式所示,

$$P_p = P_{\max} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_p^2}\right) \quad (1)$$

其中, $P_{\max} = \frac{1}{2} \rho_{\text{arc}} v_{\text{arc}}^2$, ρ_{arc} , v_{arc} 分别为氩等离子体在温度 1.5×10^4 K 下的密度和速度, v_{arc} 根据喷嘴出口面积 A 、离子气体的流量 Q 和常温下等离子体密度 ρ_0 以及 ρ_{arc} 由下式确定,

$$\rho_{\text{arc}} v_{\text{arc}} A = \rho_0 Q \quad (2)$$

可见,经验公式仅能反映离子气流量和部分反映喷嘴结构的影响。而实际上,焊接电流等也对等离子电弧力有很大的影响。

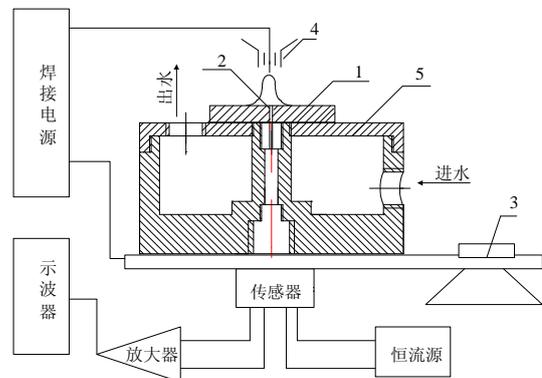
2 试验装置及试验步骤

测量电弧压力的方法有气压计的静态测定法和采用传感器的连续测定法。气压计法是将电弧压力导入一个装有一定量水柱的 U 型玻璃管的一端,使得 U 型玻璃管的两端水柱产生液面差,测量这个液面差就可以计算出电弧压力。这种方法试验装置简单,试验结果直观,缺点是只能测定静态的平均电弧压力,测量精度低,无法自动记录试验数据,早期研究电弧压力主要用这种方法。采用压力传感器的连续测定法具有测定速度较快、精度高、灵敏,实验数据便于记录处理等优点,但试验装置较复杂。本试验压力传感器的连续测定法。

图 1 所示为电弧阳极压力测试装置原理图,装置由水冷铜阳极、精密滑架以及测量电路等组成。水冷铜阳极是二体的,分为直接接触电弧的紫铜阳极和起水冷作用的水冷箱两部分,二者经螺纹紧密连接在一起,要保证二者的接触面足够大以确保电弧热能迅速传递到水冷箱,还要保证二者螺纹连接处的密封性要好,以保证电弧力全

部作用在传感器上。将水冷铜阳极设计成二体的目的是为了在紫铜阳极的压力导通孔被烧损的情况下,可以更换新的紫铜阳极。由于紫铜的导热率较大,所以采用紫铜作为阳极材料。在阳极中心加工一个直径 0.5 mm 的导通孔,电弧通过这个导通孔作用在压力传感器上。

水冷箱是由实心黄铜经过机加工而成,上盖可以旋开,这样就省去了焊接工序,其结构如图 1 中所示。水冷箱的上部连接紫铜阳极,底部连接压力传感器。冷却水从水冷箱侧面进入,从水冷箱的顶部流出,这样可以保证较好的冷却效果。水冷箱固定在可以在水平面作二维运动的精密滑架上,这样就可以测量出电弧力随径向距离的变化关系。



1—紫铜圆盘 2—压力引通孔 3—精密滑架
4—等离子弧焊枪 5—水冷铜阳极

图 1 电弧轴向压力测试装置简图

Fig.1 Schematic diagram for the arc pressure measuring equipment

试验用的传感器是北京中航机电技术公司生产的 DYC 型传感器,该传感器线性度良好,压力量程为 $0 \sim 1.6 \text{ kg/cm}^2$, 对应的输出电压信号为 $0 \sim 136.63 \text{ mV}$ 。等离子弧阳极压力最大值一般在几千帕左右,转换计算可知传感器相应的输出电压信号最大为 10 mV 左右,而直接用示波器测量十毫伏级电压值是较困难的,所以需要设计电压放大电路。

测量电弧力时首先应确定电弧的中心位置:点燃电弧,在 X 方向上移动滑架,找到一个电弧压力最大值点,再从这点开始在 Y 方向上移动滑架,找到一个压力最大值点,这就是电弧的中心位置。然后开始测量电弧力在阳极轴线方向上的分布,从电弧中心开始测量,每间隔 0.5 mm 测量一个值,记录数值并计算出对应的电弧力的值。

3 试验结果与分析

测量以下焊接参数的阳极电弧力：焊接电流 100 A，等离子气流量 4 L/min，电弧长度(从喷嘴距阳极的距离)为 6 mm，约束喷嘴孔径为 3 mm，电极内缩量为 3 mm，一般认为保护气流量对电弧力的影响不大。研究其中一个参数对阳极电弧力的影响时，其它参数保持不变。

3.1 焊接电流的影响

所测得的阳极电弧力径向分布和电流对其影响规律如图 2 所示。阳极电弧力在电弧中心最大，随径向距离的增大而迅速减小。这是因为电弧中心的等离子流速最大，对阳极造成的冲击力也最大，电弧中心处由于电磁力而增强的压强也最大，结果使得电弧中心的电弧力最大。阳极电弧力在径向距离约为约束喷嘴孔径半径处已经变得很小。

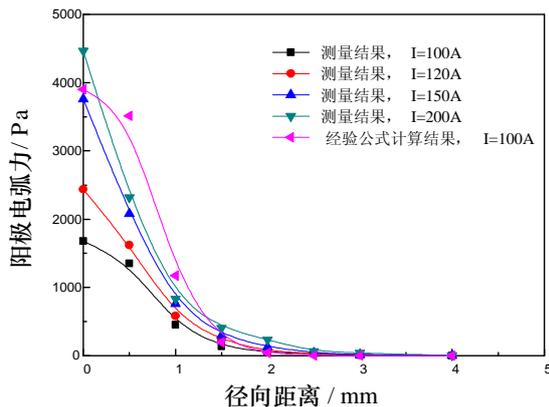


图 2 不同电流下的阳极电弧力分布

Fig.2 Arc pressure distributions with different welding current

焊接电流对阳极电弧力有很大的影响，随焊接电流的增大阳极电弧力也显著增大，但阳极电弧力的作用半径基本不随焊接电流变化。焊接电流增大，使得等离子流速增大，电磁作用力也增强，因而阳极电弧力也就增大。

根据阳极电弧力经验公式(1)计算离子气流量为 4 L/min 时的阳极电弧力径向分布，结果如图 2 所示。可见，经验公式计算得到的电弧力最大值与焊接电流为 150 A 或 200 A 时测得的最大值比较接近，但与电流为 100 A 和 120 A 所测得值有较大差别，经验公式计算值与试验值在电弧力作用半径上差别也不大，但在径向距离 0.5 mm 处经验公式计算值与试验测量结果有较大的差别。

3.2 气流量的影响

图 3 是不同离子气流量下的阳极电弧力径向分布情况。阳极电弧力随离子气流量的增加而显著增加；与焊接电流情况相同，离子气流量对阳极电弧力作用半径影响也不是很大。离子气流量增大，气流冷却作用增强，电弧收缩加剧，等离子流速增大。与焊接电流同时改变电磁作用力和电弧流动速度来影响阳极电弧力不同，气流量主要通过改变等离子流速来影响阳极电弧压力，当然气流量的变化也会影响到电弧温度分布，从而对电流密度分布有一定影响，进而影响到电磁力的大小分布，但这种影响是次要的。

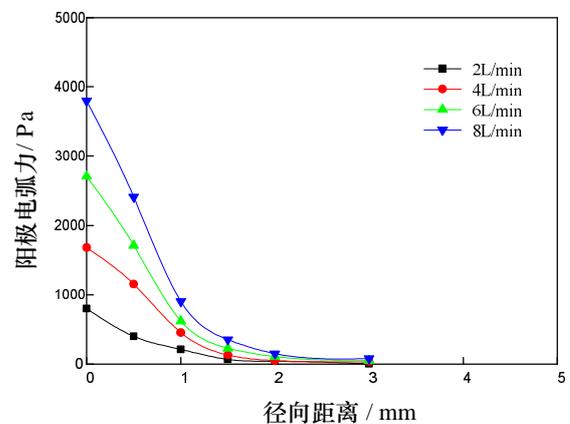


图 3 不同离子气流量下的电弧力分布

Fig.3 Arc pressure distributions with different ionized gas feed rate

3.3 弧长的影响

图 4 是弧长分别为 6、8、10 mm 时阳极电弧力径向分布情况。从图中可以看出，虽然阳极电

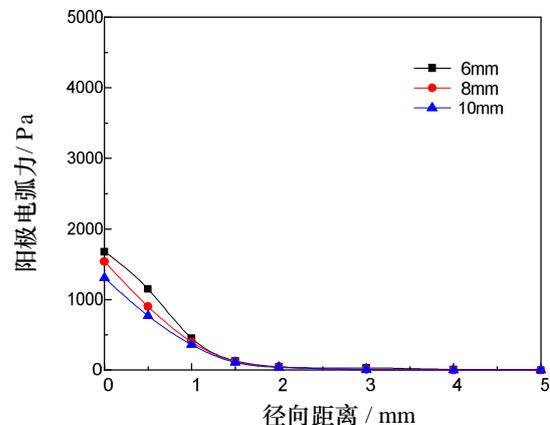


图 4 不同弧长下的电弧力分布

Fig.4 Arc pressure distributions with different arc length

弧力随弧长的增大而呈减小趋势,但不十分明显。这是由于等离子电弧的约束程度较高,电弧在轴线方向上较为集中,从而在一定范围内由于弧长增大而引起的动量损失不大。

4 结 论

(1) 设计的带有精密滑架的水冷铜阳极装置可以测定高温等离子电弧阳极电弧力的径向分布情况。

(2) 焊接电流 100 A、等离子气流量 4 L/min、电弧长度(从喷嘴距阳极的距离)为 6 mm、约束喷嘴孔径为 3 mm、电极内缩量为 3 mm 时测得的阳极电弧力在电弧取得最大值 1700 kPa,电弧力随径向距离的增大而迅速减小,在约束喷嘴孔半径处已经变得很小。

(3) 试验结果表明,焊接电流和离子气流量对阳极电弧力有很大的影响,随焊接电流和离子气流量的增大而显著增大;而弧长的影响不显著;阳极电弧力的作用半径基本不随焊接参数的变化而变化。

(4) 试验结果表明,等离子弧焊电弧力传统经验公式忽略电流对电弧力的影响是有一定缺陷的。

参考文献:

- [1] Selyanekov V N, Stupachenko M G. Measurement of the pressure of a welding arc [J]. Welding Production, 1973, 20(9): 21-24.
- [2] 胡绳荪, 鲍家铭, 孟英谦, 等. 不同介质微束水蒸气等离子弧的气流形态与电弧力 [J]. 焊接学报, 2004, 25(3): 1-3.
- [3] 代大山, 宋永伦, 张 慧, 等. 等离子电弧力的研究 [J]. 焊接学报, 2002, 23(2): 51-54.
- [4] 韩永全, 吕耀辉, 陈树君, 等. 变极性等离子电弧力学行为研究 [J]. 电焊机, 2004, 25(3): 54-57.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号 100072

装备再制造技术国防科技重点实验室

Tel: (010) 6671 7640

E-mail: gudelian945@sina.com

(上接第 81 页)

参考文献:

- [1] 林高用, 张颖. 时效制度对 LC52 铝合金组织与性能

的影响 [J]. 金属热处理, 2004, 29(10): 50-54.

- [2] 张颖, 林高用. LC52 铝合金抗剥落腐蚀性能研究 [J]. 铝加工, 2001, 151(4): 50-53.
- [3] 郑强, 陈康华, 黄兰萍, 等. 高温析出和固溶温度对 7A52 合金应力腐蚀开裂的影响 [J]. 金属热处理, 2005, 30(7): 14-16.
- [4] 刘继华, 李荻. 7×××系列 Al 合金应力腐蚀开裂的研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2001, 13(4): 218-222.
- [5] LI Hong-ying, GENG Jin-feng, DONG Xian-juan, et al. Effect of aging on fracture toughness and stress corrosion cracking resistance of forged 7475 aluminum alloy [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Mater Sci Ed, 2007, 22(2): 191-195.
- [6] 黄兰萍, 陈康华, 李松, 等. 高温析出对 Al-Zn-Mg 铝合金组织、力学性能和应力腐蚀性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(5): 727-733.
- [7] 张平, 王卫欣, 赵军军. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊接头特征分析 [J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(6): 38-42.
- [8] 傅志红, 贺地求, 周鹏展, 等. 7A52 铝合金搅拌摩擦焊焊缝的组织分析 [J]. 焊接学报, 2006, 27(5): 65-68.
- [9] 周鹏展, 钟掘, 贺地求. 7A52 铝合金厚板搅拌摩擦焊 [J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(6): 964-969.
- [10] Lorimer G W. Precipitation processes in solids [C]. Met.Sot.AIME, Warrendale, 1978: 87.
- [11] Rhodes C G, Mahoney M W, Bingel W H, et al. Effects of friction stir welding on microstructure of 7075 aluminum [J]. Scripta Materials, Vol.36. DD. 69-15, 1997.
- [12] 龙元宁, 涂益友, 蒋建清. Fe、Si 质量比对 Al-Mn 合金中第二相的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2009, 29(7): 663-666.
- [13] Mg₂Si 及 Si 粒子在 Al-Mg-Si 合金晶间腐蚀中协同作用机理的多电极偶合研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(2): 107-113.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号 100072

装甲兵工程学院 装备再制造工程系

Tel: (010) 66719249

E-mail: liqiqi_ren_0@sohu.com