

DOI: 10.7652/xjtuxb201303016

纵向磁场作用下的钨极氩弧焊电弧温度场

殷咸青, 孙江涛, 张建勋

(西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 通过采集钨极氩弧焊电弧单色图像, 采用 Fowler-Milne 法得到了纵向磁场作用下的电弧温度场, 研究了磁感应强度、焊接电流和弧长对电弧温度场的影响。结果表明: 在纵向磁场作用下, 电弧温度整体降低, 电弧体下部出现低温腔; 电弧温度场受磁感应强度、焊接电流及弧长的影响。结合电弧图像及温度场在纵向磁场作用下的变化规律, 对纵向磁场作用下电弧的演变过程进行了描述: 随着磁感应强度增大, 在洛仑兹力与自磁收缩力的共同作用下电弧出现先扩张后收缩的现象; 随着弧长变长, 低温腔变大, 阳极附近电弧中心温度变低, 且温度半径变大; 随着焊接电流的增大, 电弧作用半径及电弧的温度半径变大。

关键词: 纵向磁场; 光谱图像; 电弧温度场; 钨极氩弧焊

中图分类号: TG403 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)03-0085-05

Arc Temperature Distribution of Gas Tungsten Arc Welding in External Longitudinal Magnetic Field

YIN Xianqing, SUN Jiangtao, ZHANG Jianxun

(State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: By the spectral images of arc, the temperature field of welding arc in longitudinal electromagnetic field (LEMF) is revealed with Fowler-Milne method. It is shown that LEMF makes the temperature of arc getting lower, and a low-temperature cavity appears in the underpart of arc body. The influences of magnetic flux density, arc length, and welding current on the temperature field are discussed. The arc evolution process for different magnetic flux density is explained according to the changing regularity of arc images and temperature field. With the increasing magnetic flux density, the arc expands firstly then contracts due to the resultant of Lorentz force and self-magnetic contracting force. When the arc length gets longer, the low-temperature cavity becomes bigger, the radius of temperature near the anode increases, and the temperature gets lower at the arc centre. Both the radius of arc body and the radius of temperature field increase with the strengthening welding current.

Keywords: longitudinal magnetic field; spectroscopic image; arc temperature field; gas tungsten arc welding

外加纵向磁场作用下的焊接称为电磁搅拌焊。研究表明, 在合理的磁场参数及焊接参数条件下, 电磁搅拌焊可以细化焊缝金属的一次结晶组织, 减小

化学不均匀性, 降低结晶裂纹和气孔的敏感性, 提高焊缝金属的塑性和韧性, 增强某些金属的抗晶间腐蚀能力, 全面改善焊缝质量^[1-2]。

收稿日期: 2012-06-26。 作者简介: 殷咸青(1967—), 男, 副教授。

网络出版时间: 2012-12-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121218.0923.002.html>

外加纵向磁场对焊接质量产生影响是因为在磁场作用下,电弧及熔池金属所受的力和热均发生了变化。电弧作为焊接热源,本身是由正、负粒子组成的,对磁场作用比较敏感,所以在外加磁场作用下,电弧行为(主要包括电弧的形态、电流密度、电弧气动压力、温度场等)会发生变化,对磁场作用下电弧行为的研究将有助于更加深入地认识和理解电磁作用的机理。不少研究者对外加纵向磁场作用下电弧弧柱的气动压力^[3-4]、电流密度^[3,5-6]、电弧形态^[7]等的变化情况进行了研究,但是对于纵向磁场作用下焊接电弧温度场的实验研究,却很少有人涉及。目前,比较精确的电弧温度场测试方法主要有激光法和光谱法,其中光谱法因具有信息丰富、灵敏度高、响应速度快、无介入性、抗干扰能力强、时空分辨率高等优点而被广泛采用。光谱法中又以 Fowler-Milne 法最具代表性。早期利用 Fowler-Milne 法进行温度测量主要是通过光谱仪扫描实现的^[8-10],装置比较复杂,精确度低,而且耗时较长。随着科技的进步,数字摄影设备及数字图像处理技术迅速发展,并且获得了广泛的应用,在电弧温度测试方面,可以利用 CCD 与滤光片相结合的方法获取特定谱线的相对强度来实现^[11-13]。

本文通过采集钨极氩弧焊(GTAW)电弧的单色光谱图像,进行对称化、滤波、Abel 逆变换处理,然后利用 Fowler-Milne 法对纵向磁场作用下的电弧温度场进行测量,研究不同的磁感应强度及焊接参数(焊接电流、弧长)下电弧温度场的变化规律,并结合电弧形态,阐述纵向磁场作用下的电弧演变过程,揭示其深层次的作用机理,以期电磁搅拌焊接技术提供理论支持和实践指导。

1 试验条件

考虑到 GTAW 电弧相对比较稳定,所以试验采用 GTAW 焊接方法,直流正接,焊机型号为 YC-400TX,保护气体为氩气,气体流量为 10 L/min,焊枪电极为 Th-W 电极,直径为 3.2 mm,电极顶端锥角为 60°。外加磁场由自制的励磁线圈产生,可在线圈内部及端部附近产生近匀强磁场。励磁线圈固定在焊枪的喷嘴,且与喷嘴保持同轴,以保证励磁线圈产生的磁场方向与电弧轴线平行,并使电弧处于该近匀强磁场内。采用高速摄像机拍摄外加纵向磁场作用下的电弧照片。图 1 为试验装置示意图。

为了得到电弧的单色光谱图像,在电弧与高速摄像机镜头之间放置了窄带干涉滤光片;为防止所

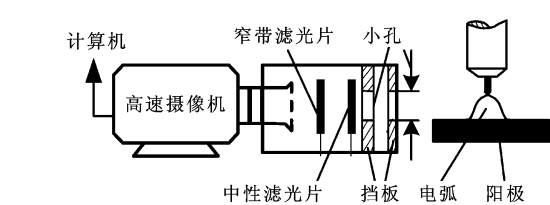


图 1 试验装置示意图

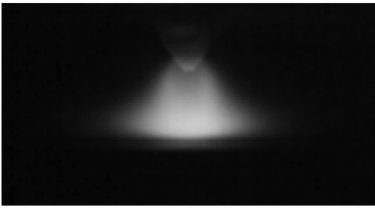
拍摄的单色光谱图像饱和,在光路中外加了中性滤光片。两滤光片的选取遵循“使所得电弧亮度最大而不至于饱和为最佳”的原则。选用的干涉滤光片的中心波长为 794.8 nm,半波带宽为 5 nm,峰值透射率为 58.8%。对于光谱的选择,文献^[13]表明 Ar I 794.8 nm 的电弧光谱线具有足够的强度,且自吸收影响很小,可以忽略。选用的中性滤光片的透过率为 3%,两滤光片的有效直径均为 25 mm。由于滤光片直径有限,无法遮挡较大范围的强光,所以拍摄在 PVC 管中进行,并且设置了 2 级挡光板,以避免杂光通过反射等途径进入 PVC 管被摄像机所接收。拍摄时,将摄像机镜头伸入 PVC 管的另一端。实验中设定摄像机曝光时间为 2 ms,拍摄速度为 200 帧/s,所得到图像的空间分辨率约为 0.07 mm,试验参数见表 1。在试验的过程中,电弧稳定后开始采集图像数据。

表 1 试验参数表

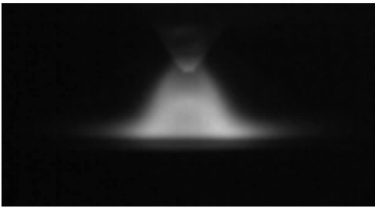
组别	磁感应强度/T	焊接电流/A	弧长/mm
1	0.00/0.02/0.04/0.06/0.08	170	3
2	0.04	170	3/4/5
3	0.04	100/150/170	3

2 试验结果与分析

图 2 所示为焊接电流 170 A、弧长 3 mm 时所拍摄的焊接电弧在波长 794.8 nm 下的单色照片。可以看出,在加了纵向磁场后,电弧的下部中心处出现了暗区,呈现钟罩形,即电弧的形态发生了较大的变化,这是因为在纵向磁场作用下,电弧中带电粒子的横向分量使电弧体出现旋转运动而形成中空电弧。虽然这些照片是加了窄带滤光片后得到的,但是仍然会有连续谱强度通过。根据文献^[13]所述,连续谱强度对用标准温度法求解温度场影响很小(误差小于 0.5%),所以本文在处理数据时,忽略连续谱的影响。根据这些单色照片,经过 Abel 逆变换算法处理,采用标准温度法即可得到电弧温度场。



(a)磁感应强度 $B=0.00\text{ T}$



(b)磁感应强度 $B=0.04\text{ T}$

图 2 试验采集到的电弧单色图像(波长为 794.8 nm)

2.1 不同磁感应强度对焊接电弧温度场的影响

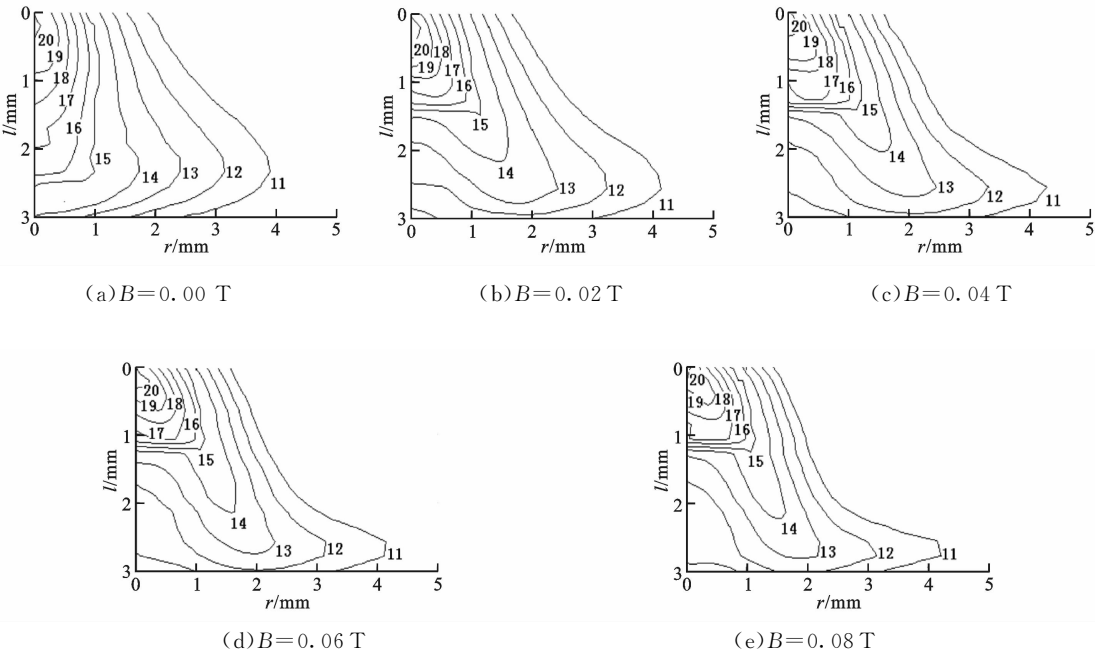
焊接电弧中存在大量带电粒子,在纵向磁场作用下,这些粒子发生旋转运动,使电弧的温度场发生改变。图 3 展示了在焊接电流 170 A 、弧长 3 mm 下不同磁感应强度所对应的焊接电弧温度场,可以看出:加了纵向磁场之后,电弧体下部出现了低温腔,且随着磁感应强度的增强,低温腔的尺寸变大,低温腔顶部的等温度线变得越来越密集,说明腔顶的温度

度梯度逐渐变大,腔顶越来越靠近阴极,腔内温度梯度越来越小;电弧体随磁感应强度增大先出现扩张趋势,在磁感应强度为 0.06 T 时出现收缩现象,并且磁感应强度越大,收缩越明显。

在纵向磁场作用下,从径向上来看,电弧下部靠近阳极的最高温度不在电弧中心,径向呈双峰分布。将电弧靠近阳极的最高温度处到中轴线的距离,定义为电弧的温度半径。从图 3 可以看出,随着磁感应强度的增加,电弧的温度半径先变大、再变小,与电弧的温度场先扩张、后收缩的规律一致。这是因为,在纵向磁场作用下,电弧体中具有一定横向速度分量的带电粒子会发生旋转,当这些旋转粒子达到一定量时,整体来看就表现出一定的旋转半径,这会使得电弧中心的带电粒子减少,进而影响电弧体中电流密度的分布,而电流密度分布又会影响热流密度分布,所以电弧中心带电粒子的减少导致了电弧中心热量的减少,形成了“低温腔”。相应地,温度场在径向上也表现出温度半径。对于电弧体及温度半径的先扩张后收缩,本文认为是由纵向磁场作用下的洛伦兹力和自磁收缩力的合力与粒子旋转时的离心力相平衡的结果,具体将在下节进行分析。

2.2 纵向磁场作用下电弧的演变模型

在纵向磁场作用下,从电弧的形态及电弧温度场可以看出:随着磁感应强度的增加,焊接电弧经历



r 为电弧的温度半径; l 为到阴极的距离; 温度场单位为 kK

图 3 纵向磁场作用下的电弧温度场

了先扩张后收缩的过程。基于这个特点,可以归纳出纵向磁场作用下的电弧演变模型,并结合电磁作用的规律,对该模型进行合理解释。

图 4 为外加纵向磁场作用下电弧的演变模型,可以看出:在纵向磁场作用下,电弧的底部出现了暗区,电弧由钟形变为钟罩形;当磁感应强度较小(如 $B=0.02\text{ T}$) 时,不管是轴向还是径向,暗区范围都较小;随磁感应强度的增大($B=0.04\text{ T}$),暗区径向变宽,轴向略有增高;当磁感应强度增大到 0.08 T 时,暗区在径向上变得较窄,而在轴向上变得较高;电弧与阳极的作用半径随磁感应强度的增大先变大、后变小。

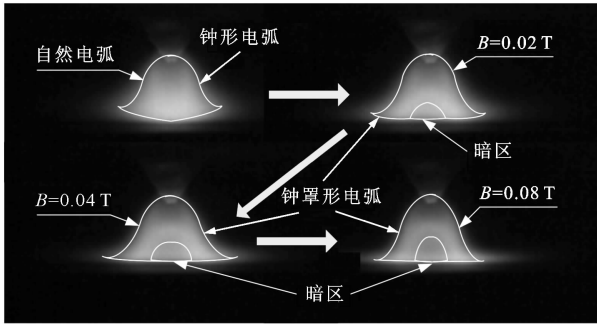


图 4 磁感应强度增大时的电弧演变模型

根据上面的分析,可以将纵向磁场作用下 GTAW 电弧模型的演变过程按磁感应强度的增加分为 2 个阶段:

在第一阶段,电弧随磁感应强度的增加逐渐扩张,形态由钟形向钟罩形演变,阳极表面处的径向温度分布由单峰分布逐步向双峰分布过渡,进入到双峰分布后温度半径慢慢变大;

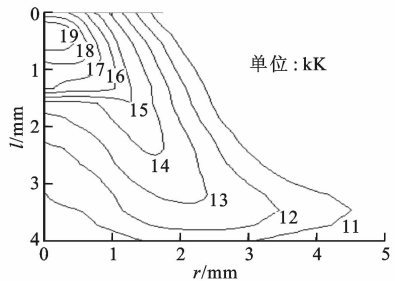
在第二阶段,随磁感应强度的增大,电弧开始逐渐收缩,阳极表面处的温度半径开始收缩。

以上电弧演变模型可作如下解释:电弧体下部出现暗区是因为电弧旋转形成了中空电弧,而电弧旋转是由电弧体中的带电粒子受到外加纵向磁场产生的洛伦兹力的作用引起的。电弧行为参数(电弧温度场、电弧形态)的“半径”的出现,是带电粒子在磁场作用下旋转运动的统计结果。由于在实际焊接时钨极具有一定的锥角且较细,所以电弧体具有上细下粗的形态。带电粒子在运动时受自磁收缩力的约束,因此在纵向磁场作用下,电弧体中的带电粒子呈现螺旋状运动。另外,由电磁理论可知,同种状态带电粒子在磁场作用下作旋转运动时,磁感应强度越大,则带电粒子所受的洛伦兹力越大,粒子的旋转半径越小。在所加磁感应强度处于第一阶段时,由

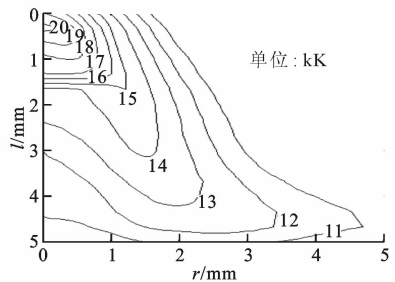
于磁感应强度较小,因而带电粒子的理论旋转半径较大,而此时粒子所受的洛伦兹力较小,在运动的过程中,由于粒子旋转分散了电弧中心的焊接电流,使中心电流密度减小,粒子所受的自磁收缩力也变小,此时洛伦兹力与自磁收缩力的合力变小,而正是该合力提供了克服旋转运动的离心力,所以该合力的减小使电弧的旋转半径变大。洛伦兹力会随着磁感应强度的增大而变大,而自磁收缩力主要与电弧形态有关,所以当磁感应强度达到一定程度后自磁收缩力变化较小。当洛伦兹力与自磁收缩力的合力达到极小值时,旋转半径达到最大值,然后进入第二阶段。在第二阶段,外加磁感应强度的作用加强,带电粒子所受的纵向磁场产生的洛伦兹力随之变大,其与自磁收缩力的合力开始变大,此时旋转半径开始变小,电弧呈现收缩的趋势。随磁感应强度增大暗区在轴向上变大,这是因为较小的磁感应强度很难克服粒子原来的运动状态,磁感应强度的增大则加强了磁搅拌作用,从而使得暗区在轴向上变大。

2.3 纵向磁场作用下弧长对电弧温度场的影响

图 5 是磁感应强度为 0.04 T ,焊接电流为 170 A ,弧长分别为 $4、5\text{ mm}$ 时电弧的温度场。结合图 3c 所示的弧长为 3 mm 时的温度场可以看出:随着弧长变长,电弧与阳极板的作用半径及电弧下部的低温区域变大,距阳极等距离截面上的温度半径变大,而电弧上部形态及低温腔体顶端到阴极端部的距离



(a) 弧长为 4 mm



(b) 弧长为 5 mm

图 5 不同弧长下电弧的温度场

基本保持不变(约为 1.5 mm)。分析可知,这是因为在焊接电流不变时,虽然弧长变长,但是电弧上部形态及带电粒子的运动情况基本不变,使得在一定的磁感应强度下,电弧上部的温度场基本保持不变。对于自然电弧,弧长越长则电弧下部直径就越大,使得电弧的电流密度分散,电弧的自磁收缩力必定较弱,而此时在相同的磁感应强度下,带电粒子所受的洛仑兹力在不同弧长时的差别较小,所以自磁收缩力与洛仑兹力的合力变小,使得带电粒子的旋转半径增大,所以低温区域及作用面积比较大。

2.4 纵向磁场作用下电流对电弧温度场的影响

图 6 是磁感应强度为 0.04 T,弧长为 3 mm,焊接电流分别为 100、150 A 时的电弧温度场,结合图 3c 所示的焊接电流为 170 A 时的温度场可以看出,随着焊接电流的增大,最高温度基本不变,电弧体半径和温度半径变大,电弧的低温腔顶逐渐远离阴极。这是因为,气体放电达到饱和时最高温度基本不变;在焊接电流较小时,电弧体各处的直径均较小,电弧的热碰撞比大电流时的弱,所以对应的横向速度分量较小,由电磁理论可知旋转半径也变小。另外,在小电流时电弧的挺度较低,更容易受到外界磁场的干扰,所以在焊接电流较小时,电弧中的带电粒子更容易受到纵向磁场的作用而进行旋转运动,使得电弧体的低温腔顶更接近阴极。

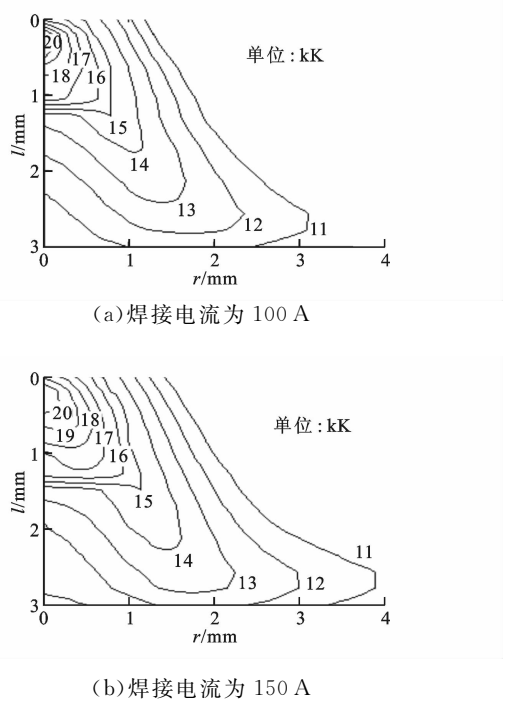


图 6 不同焊接电流下的电弧温度场

3 结 论

(1)在外加纵向磁场作用下,电弧体下部出现了“暗区”,对应着电弧温度场的低温腔,即靠近阳极的最高温度不在电弧中心,而是在径向呈双峰分布;随着磁感应强度的增大,腔的顶部越来越靠近阴极。在电弧下部各截面上,随着磁感应强度的增大,电弧温度半径先变大、再变小。

(2)随磁感应强度的增加,电弧会经历扩弧和收缩 2 个阶段,这是纵向磁场作用所产生的洛仑兹力和电弧自磁收缩力的合力与带电粒子作旋转运动的离心力相平衡后的结果。

(3)当磁感应强度和焊接电流不变时,随着弧长的增加,电弧与阳极板的作用半径、电弧下部的低温区域以及距阳极等距离截面上的温度半径均变大,电弧上部形态及低温腔体顶端到阴极端部的距离基本保持不变(约为 1.5 mm)。

(4)当磁感应强度和弧长不变时,随着焊接电流的增大,电弧体半径和温度半径变大,电弧的低温腔顶逐渐远离阴极。

参考文献:

[1] MATSUDA F, NAKAGAWA H, NAKATA K, et al. Effect of electromagnetic stirring on weld solidification structure of aluminum alloys: I Investigation on GTA weld metal of thin sheet [J]. Transactions of JWRI, 1978, 7(1): 111-127.

[2] 殷咸青,李海刚,罗键. 用电磁搅拌抑制 LD10CS 铝合金焊缝热裂纹的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1998, 32(5): 91-95.

YIN Xianqing, LI Haigang, LUO Jian. Study on the elimination of weld hot cracking of LD10CS aluminum alloy with electromagnetic stirring [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1998, 32(5): 91-95.

[3] 罗键,贾昌申,王雅生,等. 外加纵向磁场 GTAW 焊接机理 [J]. 金属学报, 2001, 37(2): 212-220.

LUO Jian, JIA Changshen, WANG Yasheng, et al. Mechanism of the gas tungsten-arc welding in longitudinal magnetic field controlling [J]. Metallurgica Sinica, 2001, 37(2): 212-220.

[4] 范红刚,史耀武,黄勇,等. TIG 焊电弧压力影响因素的试验分析 [J]. 焊接技术, 1995(5): 3-5.

[5] 孙俊生,武传松. 熔池表面形状对电弧电流密度分布的影响 [J]. 金属学报, 2000, 49(12): 2427-2432.

(下转第 119 页)