

外加纵向磁场作用下的 TIG 焊接电弧

常云龙, 杨旭, 李大用, 李多

(沈阳工业大学 先进焊接技术及自动化省级重点实验室, 沈阳 110870)



常云龙

摘 要: 以单粒子理论假设为基础, 详细阐述了外加纵向磁场在等离子体中的不均匀分布形态, 以及这种不均匀磁场对 TIG 焊接电弧形状的影响, 分析了电弧区的受力情况, 建立了等离子体中带电粒子在这种非均匀磁场中的运动方程。由分析可知带电粒子在磁场作用下的运动轨迹是一条汇聚的螺旋线, 且等离子弧外围的带电粒子的圆周运动的速度远大于弧柱中心的粒子运动速度。结果表明, 在外加纵向磁场的作用下, TIG 焊接电弧发生了明显的收缩, 激磁电流一定, 激磁频率越高, 电弧收缩越明显。

关键词: 纵向磁场; TIG 焊; 高速摄像; 等离子体

中图分类号: TG442 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2010)04-0049-04

0 序 言

等离子体是由大量的电子和正离子构成的, 并且等离子体的电子和正离子都是杂乱无章运动的, 因而对其粒子的运动规律进行研究是一个复杂的问题。这里首先提出一个假设——等离子体的单粒子理论, 等离子体的单粒子理论就是忽略这些带电粒子间的相互作用, 把等离子体视为由大量独立的带电粒子所组成的理想气体。这样就把一个“多体问题”简化成一个单体问题, 其结果适用于焊接电弧离子体。尽管这是一个近似的理论, 但在对等离子体的研究中起到了很大作用^[1,2]。

目前, 国内对磁场作用下焊接电弧特性方面的研究比较薄弱。焊接电弧特性如电弧形态以及运动特性的研究对焊缝成形机理和焊接接头质量的提高都起到关键的作用, 可以看出对电弧形态和运动特性的有效控制, 是提高焊接质量的一种有效途径和重要方法。

试验结果显示, 在外加纵向磁场作用下的电弧明显收缩, 并且在激磁电流一定的情况下, 随着磁场频率的增加电弧收缩更加明显, 并且通过数学计算验证了这一试验结果。

1 试验条件

文中所采用的外加磁场是一种交变的纵向磁

场, 占空比为 50%。该磁场由安装在焊枪上的激磁线圈产生, 激磁电流由自制的激磁电源产生, 产生磁力线方向与电弧轴线近似平行的纵向磁场, 激磁电流大小和磁场频率均可调节。采用高速摄像方法拍摄外加交变纵向磁场 TIG 焊接电弧形态, 使用 1/2 000 s 的速度拍摄, 拍摄过程在同一次电弧燃烧过程中连续进行, 以保证拍摄时焊接参数的一致性。同时在拍摄过程中采集了焊接电流波形、磁场激磁电流波形, 可以查看任意时刻焊接电流波形和激磁电流波形下的电弧形状。试验参数如表 1 所示。

表 1 焊接工艺参数

Table 1 Welding parameters

焊接电流 I/A	焊接速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	气体流量 $q_v/(L \cdot min^{-1})$	激磁电流 I_0/A	激磁频率 f/Hz
150	0.25	20	1.0	10
150	0.25	20	1.0	30
150	0.25	20	1.0	50

2 试验结果

由于试验所施加的磁场是交变的纵向磁场, 占空比为 50%, 所以磁场参数(图 1)为激磁电流 1 A, 激磁频率 10 Hz 时, 图片帧数在 12 056 ~ 12 067 之间的电弧是在没有磁场的环境中, 电弧呈现出锥形或扇形。图片帧数在 12 050 ~ 12 055 之间的电弧处在外加纵向磁场之中, 电弧与无外加磁场的电弧相比出现收缩现象。

图 2 所示的电弧是在激磁电流 1 A、激磁频率 30 Hz 的情况下拍摄的,图中的图片帧数在 12 212 ~ 12 223 之间的电弧是在外加磁场的环境中,可见电弧被压缩,呈现钟罩形,与图 1 相比更加明显,而图片帧数在 12 224 ~ 12 229 之间的电弧是在没有纵向磁场情况下的电弧,与图 1 相比较,电弧依旧呈现出锥形。

图 3 所示的是磁场参数为激磁电流 1 A、激磁

频率 50 Hz 时的电弧。图片帧数在 11 710 ~ 11 718 之间的电弧是在没有纵向磁场的条件下拍摄的;图片帧数在 11 719 ~ 11 727 之间的电弧则处于外加纵向磁场条件下拍摄的。通过对波形与摄像结果的分析,可以看出,在没有磁场的情况下电弧依旧呈现出锥形或扇形,而且在有纵向磁场作用下的电弧明显变小呈现出钟罩形。与图 1,图 2 外加纵向磁场的电弧相比收缩更加明显。

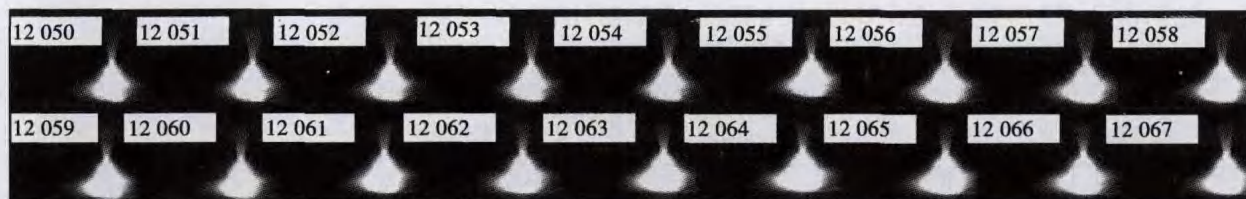


图 1 激磁电流 1 A 和激磁频率 10 Hz 时的电弧形态

Fig. 1 Arc shapes at a magnetic current of 1 A and a magnetic frequency of 10 Hz

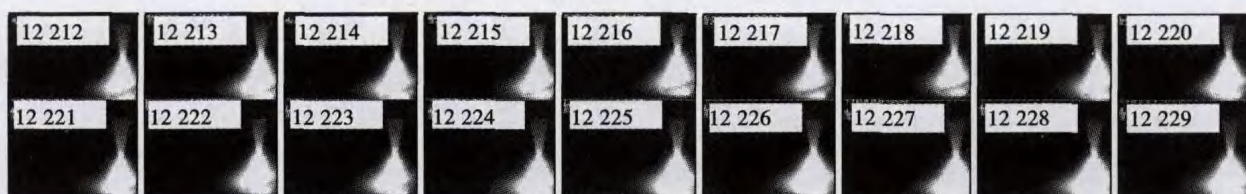


图 2 激磁电流 1 A 和激磁频率 30 Hz 时的电弧形态

Fig. 2 Arc shapes at a magnetic current of 1 A and a magnetic frequency of 30 Hz



图 3 激磁电流 1 A 和激磁频率 50 Hz 时的电弧形态

Fig. 3 Arc shapes at a magnetic current of 1 A and a magnetic frequency of 50 Hz

从图 1 ~ 图 3 可知,在外加纵向磁场的条件下,电弧被压缩,与无磁场时的电弧比较,轮廓明显变小。并且在激磁电流一定的情况下,电弧形态随着激磁频率的改变而改变,激磁频率越大,电弧收缩越明显。

3 试验结果分析

TIG 电弧的弧柱区是一个电阻率并不等于 0 的等离子体。这样的等离子体处于纵向磁场中,总会有部分磁力线穿透它,这一现象称为磁场在等离子体中的扩散,磁场在等离子体中的扩散速度与它的

电阻率成正比,电阻率越大扩散速度越高,反之则越低。TIG 焊电弧横截面上的电阻率是不相等的,中心部分温度高而电阻率小,距离电弧中心越远,温度越低,电阻率越大,这就造成 TIG 电弧内外磁场分布不均匀:在电弧周围因电阻率大、磁扩散速度高、磁力线密集、磁感应强度 B 较大,而在电弧中心电阻率小、磁扩散速度低、磁力线稀疏、磁感应强度 B 较小,如图 4 所示。另外,激磁电流频率越高,磁场变化速度越快,电弧内外磁场分布越不均匀,即电弧外部磁力线的堆积越多。这也就形成了磁场在 TIG 焊弧柱区的形态不是平行穿过等离子区域,而是形成了磁场密度中间低、周围高的非均匀磁场穿过等离

子弧区域^[2].

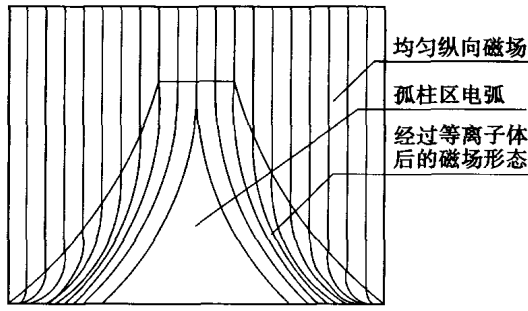


图4 纵向磁场在弧柱区的实际分布示意图

Fig. 4 Unequal distribution of longitudinal magnetic field in arc column

带电粒子在非均匀磁场中运动^[2-5] (这里假设带电粒子的运动环境里面没有电场), 关于 z 轴对称的空间磁场(图5)有

$$\mathbf{B} = B_0 \left[(1 + \alpha z) \mathbf{z} - \frac{1}{2} \alpha r \mathbf{r} \right] = B_z \mathbf{z} - B_r \mathbf{r} \quad (1)$$

式中: α 为磁感应强度 $\mathbf{B}$ 随 r 的缓慢变化量, 是一个微小的参数, 它表示磁感应强度 $\mathbf{B}$ 随 z 和 r 轴的缓慢变化量; B_0 为初始磁感应强度. 带电粒子 q 以 $\mathbf{v}$ 速度进入磁场, 在柱坐标系下, 带电粒子运动速度可表示为 $\mathbf{v} = -v_r \mathbf{r} - v_\theta \boldsymbol{\theta} + v_z \mathbf{z}$, 因此带电粒子所受洛伦兹力为

$$\begin{aligned} \mathbf{f} &= q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = qB_0 (-v_r \mathbf{r} - v_\theta \boldsymbol{\theta} + v_z \mathbf{z}) \times \\ &\left[(1 + \alpha z) \mathbf{z} - \frac{1}{2} \alpha r \mathbf{r} \right] = -qB_0 (1 + \alpha z) v_\theta \mathbf{r} - \\ &qB_0 \left[\frac{\alpha}{2} v_z r - (1 + \alpha z) v_r \right] \boldsymbol{\theta} - qB_0 \frac{1}{2} \alpha r v_\theta \mathbf{z} \\ &= f_r \mathbf{r} + f_\theta \boldsymbol{\theta} + f_z \mathbf{z} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}, \boldsymbol{\theta}, \mathbf{z}$ 分别为 r, θ, z 方向的单位矢量.

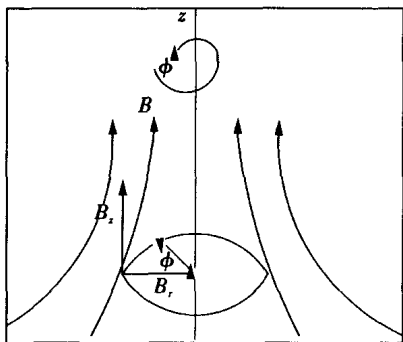


图5 非均匀磁场

Fig. 5 Non-uniform magnetic field

向分量 f_r 为负, 因此 $f_r \mathbf{r}$ 提供了带电粒子做回旋运动所需的向心力; (2) 带电粒子所受洛伦兹力分量 f_θ 为负, 带电粒子速度分量 v_θ 逐渐增大, 即做回旋运动的速度逐渐增大; (3) f_z 为负, 在 $f_z \mathbf{z}$ 作用下, 粒子速度的 z 向分量逐渐减小, 即前进速度逐渐减小.

这样, 带电粒子以一定的速度进入磁场后, 将环绕 z 轴作螺旋线运动, 其沿 z 轴前进的速度逐渐减小, 而作回旋运动的速度逐渐增大. 由于洛伦兹力不做功, 因此带电粒子动能保持不变, 即

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m (v_p^2 + v_v^2) = C_1 \quad (3)$$

式中: v_p 为与 z 轴平行的速度分量; v_v 为与 z 轴垂直的速度分量; C_1 为动能. 求得

$$\frac{dv_p^2}{dt} = -2v_p \frac{dv_p}{dt} = -2v_z \frac{dv_z}{dt} \quad (4)$$

由于 $v_z = \frac{dz}{dt}$, 则

$$f_z = m \frac{dv_z}{dt} = -\frac{1}{2} q B_0 \alpha r v_\theta, \frac{dB_z}{dt} = \alpha B_0, r = \frac{m v_\theta}{q B_z}$$

因此, 代入上式可以得

$$\frac{dv_v^2}{v_\theta^2} = \frac{dB_z}{B_z} \quad (5)$$

由于 $\alpha r \ll 1$, 因而磁感应强度 $\mathbf{B}$ 通常具有一个很大的 B_z 分量和一个很小的 B_r 分量, 所以 $B \approx B_z$. 此外, 带电粒子的径向运动速度分量很小, 可近似认为

$$v_v = \sqrt{v_\theta^2 + v_r^2} \approx v_\theta$$

则上式可改写为

$$\frac{dv_v^2}{v_v^2} = \frac{dB}{B} \quad (6)$$

积分后可得

$$\ln v_v^2 = \ln B + \ln C_2$$

其中 C_2 为常数, 即 $C_2 = \frac{v_v^2}{B}$ (7)

通过上述分析表明以下两个问题.

(1) 带电粒子在非均匀磁场中运动, 螺旋半径 r 随着 B 的增加而减小, 其运动轨迹为一条汇聚螺旋线, 即

$$r = \frac{m v_v}{q B} = \frac{m}{q B} \sqrt{B C_2} = \frac{m}{q} \sqrt{\frac{C_2}{B}} \quad (8)$$

可以看出 r 与 $\sqrt{B}$ 成反比.

(2) 带电粒子的横向速度分量 v_v 随着 B 的增加而逐渐增大. 由于 $v_v = \sqrt{v^2 - v_p^2}$, 可得

$$v_v = v \sin \theta \sqrt{\frac{B}{B_0}} \quad (9)$$

等离子体横向运动的半径受到约束, 向两端运动时的半径逐渐缩小, 因而等离子体受到磁场的约

式(2)表明: (1) 带电粒子所受洛伦兹力的径

束. 然而等离子体在一定的磁场强度下不会一直被压缩, 还存在着等离子体在磁场中的平衡条件, 这个条件的存在直接影响电弧弧柱区的弧柱形状, 下面对这一平衡条件进行简要的分析, 处于磁场中等离子体的平衡条件为^[2,6-8]

$$\frac{B_1^2}{2\mu_0} - \frac{B_2^2}{2\mu_0} = KnT \quad (10)$$

式中: B_1 为等离子体外的磁感应强度; B_2 为等离子体内的磁感应强度; μ_0 为真空中的导磁率; K 为波尔兹曼常数; n 为等离子体密度; T 为等离子体的平均温度; $\frac{B_1^2}{2\mu_0}$ 为包围在电弧外部磁场对电弧的

磁压力, 方向指向电弧内部; $\frac{B_2^2}{2\mu_0}$ 为电弧内部的磁压力, 方向指向电弧外部; K, n, T 为电弧中粒子处于不停运动所具有的向外的动压力. 激磁电流频率越高, 磁场变化速度越高, 磁场在电弧中磁扩散层越薄, 也就是说, 在电弧外堆积的磁力线越多. B_1 越大, 电弧外磁压力 $\frac{B_1^2}{2\mu_0}$ 也就越大, 压差 $\frac{B_1^2}{2\mu_0} - \frac{B_2^2}{2\mu_0}$ 也就越大, 电弧就会被压缩的越小, 但在一定的磁场强度下电弧的形态是一定的.

在无纵向磁场的稳态电弧中, 存在着电子、正离子和中性粒子的径向分压梯度, 因此, 电子和正离子经历着由内向外的双极性扩散, 而中性粒子则经历着由外向内的扩散. 在稳态情况下, 向内和向外的运动是相互平衡的, 施加纵向磁场后, 因为磁力线具有阻止带电粒子横跨磁力线运动的作用, 所以带电粒子向外扩散减弱了, 而中性粒子向内扩散不因纵向磁场的存在而减少, 因此, 在引起电弧压力增大的同时, 使得电弧压力梯度增大^[8].

4 结 论

(1) 纵向磁场在通过等离子体时不是呈现出磁场密度均匀, 而是呈现出中间磁场密度低、周围磁场密度高的非均匀磁场.

(2) 在外加交变纵向磁场的作用下, TIG 焊电弧发生了明显的收缩, 而且激磁频率越高, 电弧收缩越明显. 在磁场的作用下, 电弧开始旋转, 旋转速度越来越快.

(3) 通过推导得出, 带电粒子在该磁场作用下

的运动轨迹是一条汇聚的螺旋线, 且等离子弧外围的带电粒子的圆周运动的速度远大于弧柱中心的粒子运动速度.

(4) 由于磁场只对带电粒子产生作用, 因此在引起电弧压力增大的同时, 使得电弧压力梯度增大了.

参考文献:

- [1] 程守洙. 普通物理学: 第二册[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [2] 赵凯华, 陈希谋. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [3] 刘爱红, 余守宪. 轴对称缓变磁场中的等离子体与磁约束原理[J]. 物理与工程, 2002, 12(5): 14-17, 23.
Liu Aihong, She Shouxian. Plasma in slow-varying magnetic field with axial-symmetry and principle of magnetic confinement[J]. Physics and Engineering, 2002, 12(5): 14-17, 23.
- [4] 邝向军. 带电粒子在典型非均匀磁场中的运动[J]. 陕西工学院学报, 2004, 12(4): 63-65.
Kuang Xiangjun. On the movement of electriferous particle in asymmetrical magnetic field[J]. Journal of Shanxi Institute of Technology, 2004, 12(4): 63-65.
- [5] 李兴鹭. 带电粒子在非均匀磁场中的漂移运动分析[J]. 湖北民族学院学报, 2002, 20(1): 70-74.
Li Xingao. Analysis of drift move of charged particle in the non-uniform magnetic filed[J]. Journal of Hubei Institute for Nationalities, 2002, 20(1): 70-74.
- [6] 李 辉, 夏维东. 磁旋转弧等离子体中的弧电压突变现象[J]. 核聚变与等离子体物理, 2004, 24(3): 215-218.
Li Hui, Xia Weidong. Phenomenon of the sudden change of arc voltage in the arc plasma rotated by magnetic field[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2004, 24(3): 215-218.
- [7] 刘海侠. 利用磁场改善 TIG 高速焊的焊缝成形[J]. 河北工程技术职业学院学报, 2002, 4(1): 37-39.
Liu Haixia. Use magnetic-neld to improve the appearance of weld of TIG welding at a high speed[J]. Journal of Hebei Engineering & Technology Vocational College, 2002, 4(1): 37-39.
- [8] 郭连权, 于凤鸣. 均匀纵向磁场对电弧压力梯度的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 1999, 21(2): 172-174.
Guo Lianquan, Yu Fengming. Influence of an uniform axial magnetic field on the pressure gradient in arc[J]. Journal of Shenyang Polytechnic University, 1999, 21(2): 172-174.

作者简介: 常云龙, 男, 1963 年生, 博士, 教授. 主要从事焊接工艺设备及自动化方面的教学和科研工作. 发表论文 40 余篇.

Email: sychyl@126.com