

横向旋转磁场作用下 TIG 焊电弧的运动机制

卢振洋, 白韶军, 汤金蕾, 张晓亮

(北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100022)

摘 要: 设计了一种横向旋转磁场发生装置, 通过调节低频载波的频率和高频调幅波的占空比来控制旋转磁场的旋转速度和磁感应强度的幅值。将该装置应用于 TIG 焊, 结合理论分析和试验手段, 揭示了横向旋转磁场作用下 TIG 焊电弧的运动机制。结果表明, 横向旋转磁场作用下 TIG 焊电弧有规律地作交替进行的旋转运动和偏移运动, 并且电弧的旋转半径和旋转速度都是变化的。

关键词: 横向旋转磁场; TIG 焊; 调幅

中图分类号: TG 403

文献标识码: A

文章编号: 0254-0037(2008)09-0902-06

磁控电弧焊接工艺是基于外加磁场与电弧等离子体之间的可作用性, 根据不同的应用要求, 对焊接电弧施加合理型式的外部磁场来控制电弧形态, 达到改善焊接工艺性能的目的, 例如利用横向磁场摆动电弧以抑制偏吹^[1], 利用尖角磁场压缩电弧以提高电弧的能量密度^[2-3], 利用纵向磁场和横向旋转磁场旋转电弧以改善焊缝成形等^[4-9]。其中利用横向旋转磁场旋转电弧是近年焊接界提出的一种较新的磁控电弧焊接工艺, 同以往施加静态或者低频交变磁场的情况不同, 它采用高频动态磁场来带动电弧的旋转, 从而有效地控制旋转电弧的形态和运动特征^[10-12]。尽管这种磁场对电弧的控制效果已为大家所认可, 但是其作用机理还没有彻底弄清楚。鉴于此, 本文采用理论分析与试验手段相结合的方式, 系统地研究了横向旋转磁场作用下 TIG 焊电弧的运动机制, 从而为横向旋转磁场发生装置的优化设计以及该工艺在工程上的应用提供了理论基础和技术支持。

1 横向旋转磁场发生装置的设计

横向旋转磁场发生装置主要包括电源和磁头, 其中电源用于产生三相单六拍的励磁电流, 而磁头产生与励磁电流相对应的磁场。电源的设计思想如图 1 所示: 220 V 工频交流电经降压、EMI 网络、整流、滤波后, 输出约 36 V 的直流电压供给 2 个并联的 IPM 模块, 通过控制 IPM 的驱动信号, 输出三相单六拍的脉冲电压作用于 6 个励磁线圈 L1~L6 (如图 2 所示, 其中 T_1 和 T_2 分别表示低频载波和高频调幅波的周期)。

旋转磁场的频率控制电路由 NE555 定时器和环行分配器 748036 以及分频电路组成, 其中 555 定时器产生频率为 50~1 000 Hz、占空比为 50% 的低频载波, 环行分配器 748036 再对该低频载波进行处理并输出三相单三拍的波形, 经分频电路后得到三相单六拍的控制信号。

励磁电流控制电路的核心器件采用 SG3525, 它能够产生频率为 19 kHz, 占空比为 10%~50% 的高频调幅波。将该高频调幅波和上述三相单三拍的控制信号进行“与”运算后, 得到 IPM 的驱动信号。显然, 调节低频载波的频率和高频调幅波的占空比可分别控制励磁转换速度和励磁电流的幅值, 即分别控制了横向旋转磁场的旋转速度和磁感应强度的幅值。

横向旋转磁场的磁头设计应与焊枪做成一体, 并且相互绝缘, 还要保证磁柱的温度在强电弧辐射热的影响下仍稳定在居里点以下, 另外还需考虑磁头小型化等因素。为此, 本研究采用 6 个直径为 $\Phi 7$ 的磁柱

收稿日期: 2007-04-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50205001).

作者简介: 卢振洋(1957-), 男, 北京人, 教授.

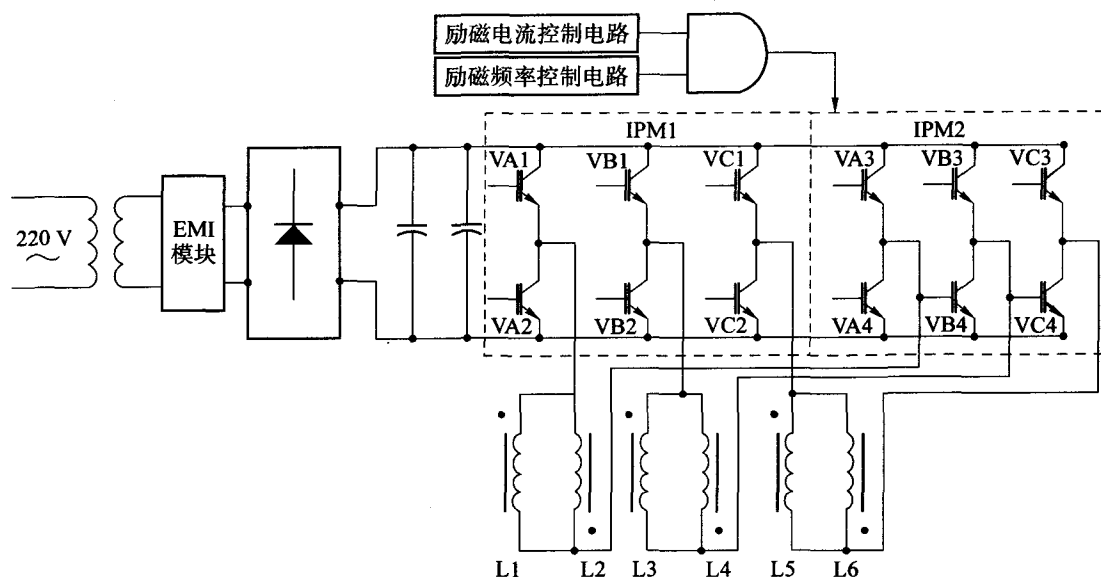


图1 励磁电源的设计原理

Fig.1 Design principle of exciting power

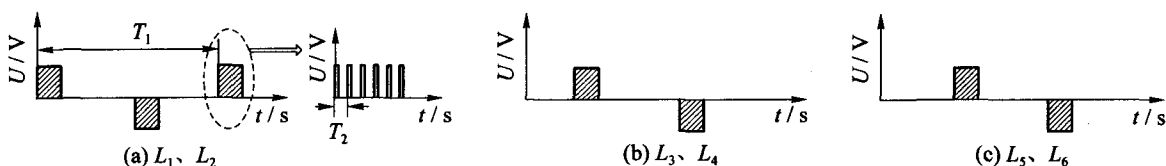


图2 励磁电压示意图

Fig.2 Schematic diagram of exciting voltage

均匀分布在同一圆周上,每个磁柱上密绕150匝、直径为 $\Phi 0.5$ 的绝缘铜线圈,再将所有磁柱置于一个冷却腔(材料为黄铜)中,焊接过程中采用循环水冷却磁柱。

2 横向旋转磁场作用下 TIG 焊电弧运动机制

假如在某一时刻对 TIG 焊电弧施加励磁电流幅值为 I_e 、励磁频率为 f 的横向旋转磁场,并且励磁转换顺序为:L1、L2 正向励磁→L3、L4 正向励磁→L5、L6 正向励磁→L1、L2 反向励磁→L3、L4 反向励磁→L5、L6 反向励磁→L1、L2 正向励磁...,那么每拍的励磁时间以及每2拍之间的时间间隔都为 $1/12f$ 。下面根据线圈的励磁转换顺序逐步分析电弧的受力和运动情况,从理论上揭示横向旋转磁场作用下 TIG 焊电弧的运动规律。

2.1 L1、L2 正向励磁

由于线圈 L1 与 L2 并联且极性相反,因此当 L1、L2 正向励磁时,焊接区域产生了如图3所示的瞬时横向磁场 B ,图中6个圆代表内部放置磁柱的6个励磁线圈,其中用粗实线绘制的圆表示正在励磁的线圈。

若以电极轴线为 Z 轴、磁场方向为 X 轴、阳极弧根的初始位置为坐标原点 O 建立三维坐标系,则电弧的受力和运动情况如图4所示,其中 F_h 和 F_m 表示电弧自身回复力和磁场力, F_{hx} 、 F_{hy} 分别为 F_h 的 Z 向分量和 Y 方向分量,磁场 B 分别与焊接电流 I 的 Y 向分量 I_y 和 Z 向分量 I_z 作用而形成了磁场力 F_m 的 Z 向分量 F_{mz} 和 Y 向分量 F_{my} 。显而易见,电磁力 F_m 是驱动力,它能克服电弧自身回复力 F_h 的作用,从而使电弧偏离电极轴线一定的距离,因此也可以称 F_m 为稳弧力。

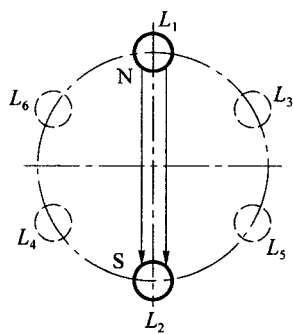


图3 L1和L2正向励磁时的磁场

Fig.3 Magnetic field generated by forward exciting of L1 and L2

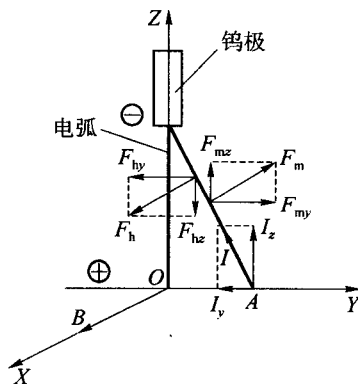


图4 L1和L2正向励磁时的电弧受力分析

Fig.4 Stress analysis of arc when forward exciting of L1 and L2

上面之所以提出电弧存在回复力,是基于这样的事实:

1) 只有当外加磁场强度足够大,电弧才能发生偏移,否则电弧几乎不动;

2) 对于一个稳定燃烧的自由电弧,当外加横向磁场后,电弧的阳极弧根只能沿垂直于磁场方向移动一定的距离,而不是无限偏移;

3) 外加磁场消失后,电弧将恢复到原来的位置和形状。

由上可知,回复力的功能在于它能抵抗外部的干扰并使电弧恢复到原来的位置和形状,据此可定义它的方向与大小:回复力的方向应与电弧截面垂直并指向电极轴线;回复力的大小随焊接电流和电弧偏移距离的增大而增大,当电弧位置处于电极轴线上时,回复力最小为0。

在L1、L2正向励磁的这段时间内,电弧在 F_h 和 F_m 的共同作用下,其阳极弧根的位置从O点偏移到A点,也就是说施加横向旋转磁场时,起初电弧的运动并不是旋转运动,而是偏移运动。

2.2 L3、L4正向励磁

当L1、L2正向励磁结束后,L3、L4并不立即励磁,而是经历 $1/12f$ 的时间间隔,这段时间内焊接区域无磁场,TIG焊电弧仅在自身回复力 F_h 的作用下沿线段AO方向作偏移运动,当L3、L4正向励磁开始时,阳极弧根将偏移到另一位置B点(图3中未标出)。显然,若保证电弧作圆周运动,B点与O点必定不重合,否则电弧始终作偏移运动。

一旦L3和L4正向励磁开始,焊接区域重新建立了横向磁场 B' ,与L1和L2正向励磁的过程相比,这时磁场的大小保持不变,焊接电流 I 的大小和方向也不变,只不过磁场方向在XOY平面顺时针旋转了 60° ,如图5所示。这种情况下电弧所受到的磁场力 F'_m 和上面所提到的 F_m 不同: F_m 只在YOZ平面内有分量 F_{my} 、 F_{mz} ,而 F'_m 不仅在YOZ平面内有分量 F'_{my} 、 F'_{mz} ,在X轴方向上还存在分量 F'_{mx} ,如图6所示。很明显, F'_m 的分量 F'_{my} 、 F'_{mz} 的作用同 F_{my} 、 F_{mz} 相类似,都属于稳弧力,但是 F'_{mx} 垂直于焊接电弧,其作用不是稳弧,而是使电弧绕电极轴线旋转,因此称之为旋弧力。

容易看出,电弧在稳弧力、回复力和旋弧力的共同作用下作圆周运动,其阳极弧根沿着曲线BC从B点运动到垂直于磁场 B' 的平面上的C点,但是稳弧力在此过程中逐渐增大,而旋弧力逐渐减小,这说明旋转电弧的运动轨迹不是标准的圆弧,并且电弧的旋转速度也在变化。当阳极弧根到达C后,电弧所受的旋弧力为0,这时电弧仅受到回复力和稳弧力的作用,因而阳极弧根在直线OC上作偏移运动。

2.3 L5、L6正向励磁

当L3、L4正向励磁结束时,电弧在自身回复力的作用下沿线段CO方向作偏移运动,这一阶段将持续到L5、L6开始正向励磁,此后电弧的运动又将重复L3和L4正向励磁时的过程。由此类推,当1个周期的励磁过程结束后,横向旋转磁场的方向将变化 360° ,同时电弧也正好旋转了 360° 。

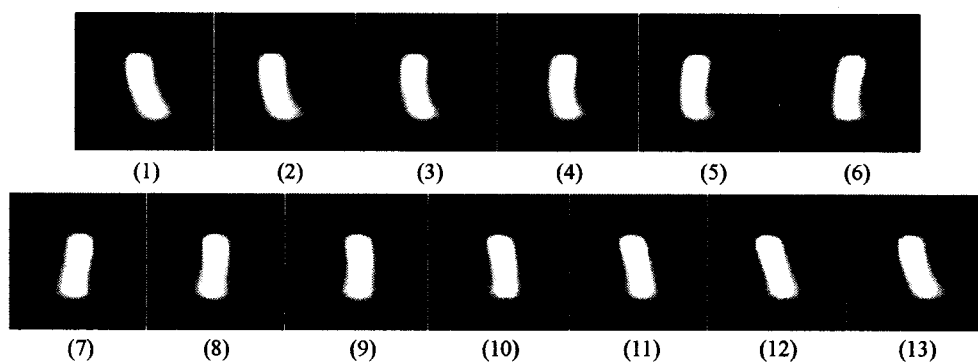


图7 一个周期内的电弧运动行为

Fig.7 Behavior of arc in a rotating period

转磁场始终作同步圆周运动,而且电弧的旋转半径随着励磁频率的增大从 14.2 减小到 9 mm.

以上结果说明了横向旋转磁场作用下 TIG 焊电弧的运动快慢完全取决于励磁频率的大小而与励磁电流无关,但是电弧形态是由励磁电流和励磁频率共同决定,即电弧的旋转半径随着励磁电流的增大或励磁频率的减小而增大.

4 结论

1)分析了横向旋转磁场作用下 TIG 焊电弧的运动机制,为磁场发生装置的进一步优化设计提供了理论依据.

2)高速摄像的结果证明,TIG 焊电弧的运动与横向旋转磁场的变化完全同步,并且电弧的旋转半径随着励磁电流的提高或励磁频率的降低而增大.

参考文献:

- [1] 张九海,王其隆,韦伟平.小电流 TIG 焊电弧磁控特性的研究[J].焊接学报,1990,6(1):40-48.
ZHANG Jiu-hai, WANG Qi-long, WEI Wei-ping. A study of the characteristics of magnetic control for low current TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1990, 6(1): 40-48. (in Chinese)
- [2] 赵彭生,祝树燕,赵国华.双尖角磁场再压缩等离子弧的物理特性及焊接工艺性能[J].焊接学报,1986,5(1):7-14.
ZHAO Peng-sheng, ZHU Shu-yan, ZHAO Guo-hua. Physical features and welding characteristics of a plasma arc re-constricted by a dual-cusp magnetic field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1986, 5(1): 7-14. (in Chinese)
- [3] 李景波,王东健,王刚,等.冶金高炉炉体横环缝自动化焊接技术及设备的研究与应用[J].焊接,2006(4):47-50.
LI Jing-bo, WANG Dong-jian, WANG Gang, et al. Automatic welding technology and equipment of transverse girth seam for metallurgical blast-furnace body[J]. Welding & Joining, 2006(4): 47-50. (in Chinese)
- [4] YIN Shu-yan, CHEN Shu-jun, WANG Jun, et al. Mathematical model and magnetic-control mechanism of the stability of rotating spray transfer[J]. China Welding, 2003, 8(1): 57-61.
- [5] 贾昌申,罗键,贾涛,等.外加间歇交变纵向磁场对 GTAW 焊缝气孔的抑制[J].航空工艺技术,1999,20(3):26-29.
JIA Chang-shen, LUO Jian, JIA Tao, et al. Longitudinal magnetic fields gas Tungsten arc welding Al alloy porosity[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 1999, 20(3): 26-29. (in Chinese)
- [6] BOLDYREV A M, BIRZHEV V A. Effect of the longitudinal magnetic field on penetration capacity of the straight polarity welding Arc[J]. Welding Production, 1982, 4(4): 8-10.
- [7] BROWN D C, CROSSLEY F A, RUDY J F. The effects of electromagnetic stirring and mechanical vibration on arc welds [J]. Welding Journal, 1962, 37(2): 241-250.
- [8] 陈树君,王学震,华爱兵,等.磁控电弧旋转磁场发生装置的设计[J].电焊机,2006,36(5):47-50.
CHEN Shu-jun, WANG Xue-zhen, HUA Ai-bing, et al. Rotating magnetic field generator used to control welding arc[J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(5): 47-50. (in Chinese)

- [9] 孙俊生, 武传松. 电弧压力对 MIG 焊接熔池几何形状的影响[J]. 金属学报, 2001, 37(4): 434-438.
SUN Jun-sheng, WU Chuan-song. The influence of arc pressure on the MIG weldpool dimensions[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(4): 434-438. (in Chinese)
- [10] 陈树君, 华爱兵, 殷树言, 等. 旋转磁场作用下的 TIG 焊电弧运动特征[J]. 焊接, 2006, 16(10): 34-36.
CHEN Shu-jun, HUA Ai-bing, YIN Shu-yan, et al. Arc movement characteristics of TIG welding in a rotating magnetic field[J]. Welding & Joining, 2006, 16(10): 34-36. (in Chinese)
- [11] HENDERSON I, SEIFERT K. Investigation of different methods of protecting the molten metal pool in narrow-gap welding of a structural steel for nuclear reactor use[J]. Welding and Cutting, 1976, 28(8): 291-293.
- [12] NAKAMURA T, HIRAOKA K. Characteristics of bead formation phenomena in narrower gap welding and proposal of new welding process at ultra-narrow gap joint[J]. Quarterly Journal of the Japan Welding Society, 1998, 19(1): 44-53.

The Moving Mechanism of TIG Arc Under a Transverse Rotating Magnetic Field

LU Zhen-yang, BAI Shao-jun, TANG Jin-lei, ZHANG Xiao-liang

(College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: A transverse rotating magnetic field generator is designed, in which the rotating speed and the maximum amplitude of magnetic flux density are separately controlled by frequency of carrier wave and duty cycle of modulated wave. Based on theoretical analysis and test, the moving mechanism of TIG arc is found when applying the generator to TIG. The experiment results show not only the TIG arc is regularly rotating and offsetting, but also both the rotating speed and the rotating radius are variable.

Key words: transverse rotating magnetic field; TIG; modulation

(责任编辑 苗艳玲)