

①
66-69.74

TIG 焊外加间歇交变纵向磁场的数值计算

罗 键, 殷咸青, 李海刚, 宁先进, 单茂华

(西安交通大学, 710049, 西安)

TG 457.11

摘要: 针对奥氏体不锈钢 TIG 焊接时, 与电极同轴的单个轴对称空心圆柱线圈在双向脉冲矩形励磁电流作用下产生的间歇交变纵向磁场, 采用无瑕点单积分磁场的数学模型, 对 TIG 焊外加间歇交变纵向磁场进行了数值计算, 该方法具有模型简单、计算速度快和精度高等优点。在此基础上, 讨论了该间歇交变纵向磁场的分布、磁场的均匀性及其纵向分量与横向分量的比率等规律, 为深入研究外加磁场对 TIG 焊的影响奠定了良好的基础。

关键词: TIG 焊; 纵向磁场; 数值计算; 不锈钢

中国图书资料分类法分类号: TG41

Numerical Calculation of External Intermittent and Alternative Longitudinal Magnetic Field in Stainless Steel Tungsten Inert Gas Welding

Luo Jian, Yin Xianqing, Li Haigang, Ning Xianjin, Shan Maohua

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A non-singular single integral mathematical model is applied to calculate the external intermittent and alternative longitudinal magnetic field induced by a single axisymmetrical and cylindrical hollow coil. The coil is coaxial with the reference electrode and excited by a revisable pulsed current of square wave. Austenitic stainless steel is used for the TIG welding. Numerical calculation are made to obtain the magnetic field distribution and equalisation and ratio of traverse and axial branch of the external magnetic field.

Keywords: TIG welding; longitudinal magnetic field; numerical calculation; stainless steel

近年来,电磁作用电弧焊技术得到了极大的发展,应用日益广泛。在 TIG 焊接时,外加间歇交变纵向磁场可以改变熔池金属的结晶状况,细化焊缝的一次结晶组织,减小化学不均匀性,提高焊缝金属的塑性和韧性,降低结晶裂纹和气孔的敏感性,全面改善焊接接头的质量,在航空、航天、冶金、机械等部门具有广阔的应用前景和巨大的实用价值^[1~3]。

TIG 焊的外加间歇交变纵向磁场一般是由与电极同轴的单个空心圆柱线圈在双向脉冲矩形励磁电流作用下产生的。间歇交变纵向磁场可以促使电弧周期性、间歇地正反向旋转,改变电弧等离子流力和电流密度的径向分布,驱动熔池中液态金属的流动,影响母材的熔化和焊缝成形^[2,3]。由此可见,对外磁场的认识是彻底掌握外加间歇交变纵向磁场 TIG

收稿日期: 1998-06-12. 作者简介: 罗 键,男,1971 年 12 月生,机械工程学院焊接研究所,博士生。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59775059)。

焊技术的关键之一。

但是,到目前为止,国内外学者对电磁作用 TIG 焊外加磁场(包括外加间隙交变纵向磁场)的研究还比较薄弱,一般使用一个较宏观的磁感应强度将其描述为一个均匀磁场,忽略其分布的不均匀性,这显然与实际情况不相符合。究其原因,主要是因为多数研究者对此认识不足,研究工作主要集中在做焊接工艺试验,对电磁作用 TIG 焊接接头进行冶金、力学性能、显微组织、结构等方面的研究;另一方面,对外加间隙交变纵向磁场 TIG 焊而言,外加磁场的情况更加复杂,实际测量其分布比较困难。因此,利用高度发展的计算机数值模拟技术,开展外加间隙交变纵向磁场 TIG 焊外加磁场的研究,以促进磁控弧焊技术的蓬勃发展,具有决定性的意义。

1 外加间隙交变纵向磁场 TIG 焊接工艺

本文以外加间隙交变纵向磁场 TIG 焊为研究对象。试验用材料为 1Cr18Ni9Ti 板材,厚度为 4 mm;电弧长度 0.5~3 mm,直流正极性(DCSP)接法,钨极直径 3.2 mm。在普通 TIG 焊的基础上施加间隙交变纵向磁场,励磁频率 0.5~1.5 Hz。

采用单个轴对称空心圆柱线圈来建立以一定频率间歇交变的纵向磁场,磁场产生装置如图 1 所示。由图可见,与其他弧焊控制方法相比,该技术具有附加装置简单、投入成本低、效益高的优点。励磁线圈安装在 TIG 焊枪的喷嘴上,与钨极同轴,线圈的励磁电流为双向脉冲电流波形(如图 2),因而形成间歇交变纵向磁场(或称同轴磁场)。轴对称空心圆柱线圈具有易于制作、和其他线圈相比每单位体积绕线产生的磁场最大等优点。

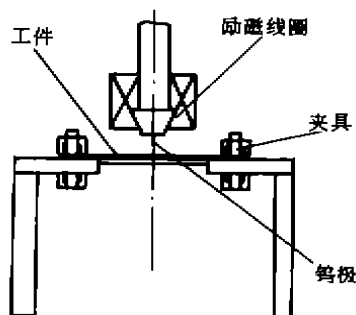


图 1 焊接装置示意图

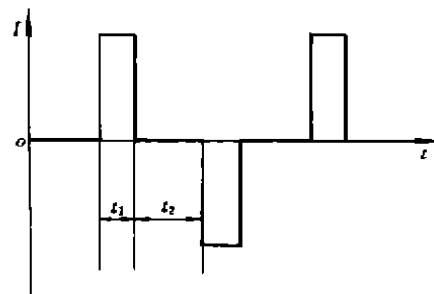


图 2 励磁电流波形示意图

2 TIG 焊外加间隙交变纵向磁场的计算

由上可知,TIG 焊的外加间隙交变纵向磁场由单个空心线圈产生,线圈具有轴对称性。结合 1Cr18Ni9Ti 不锈钢 TIG 焊接的实际情况,本研究使用积分方程法对外加间隙交变纵向磁场进行数值计算,这是因为积分方程法特别适合开域问题与连续计算场情况,仅需对场源及非线性区进行离散;在数值化处理过程中剖分数据准备简单,代数方程求解工作量小,占用计算机内存少,对线性问题具有较高的计算精确度^[4,5]。

2.1 TIG 焊外加间隙交变纵向磁场的类型分析与计算方法

外加间隙交变纵向磁场 TIG 焊接不锈钢 1Cr18Ni9Ti 时,由于不锈钢 1Cr18Ni9Ti 是顺磁材料,在磁场计算中可以不考虑其磁化性能。安装励磁线圈的 TIG 焊枪喷嘴部分采用非金属的陶瓷材料制造,对于直径较小、温度较高的钨极,完全可视为非铁磁介质,不影响励磁线圈产生的间歇交变纵向磁场。考虑到励磁频率较低,因此,不失其真实性。1Cr18Ni9Ti 不锈钢 TIG 焊外加间隙交变纵向磁场的数值计算可简化为开域、连续、线性、轴对称和时变场问题,本文采用无限点单积分法的数学模型^[5,6]求解。

无限点单积分法是电磁场积分方程法中的一种数值计算方法,它从宏观的角度来描述场,仅需对场源进行离散,因为场中每点的值仅取决于所有场源对它的影响,场点和场源点的联系通过毕奥-沙伐定理来实现,它将所有积分化为常积分计算式。

2.2 TIG 焊外加间隙交变纵向磁场的数学模型

TIG 焊的励磁线圈如图 3 所示。选取轴对称圆柱坐标系 (ρ, φ, z) ,原点 o 位于线圈的几何中心, z

轴为线圈的对称轴,其正方向指向电弧,电流密度沿截面均匀分布,规定其正方向和 z 轴正向构成右手螺旋关系,则空间任意点(不包括对称轴 $\rho=0$)磁感应强度的无限点单积分法的计算公式为

$$\mathbf{B}(\rho, z) = \omega \sum_{i,j=1}^2 (-1)^{i+j} [F_{\rho}(A_i, Z_j) \mathbf{e}_{\rho} + F_z(A_i, Z_j) \mathbf{e}_z] \quad (\rho \neq 0)$$

式中 $\omega = \mu_0 J / (2\pi)$; $A_i = a_i / \rho$;

$$Z_j = [(-1)^j b - z] / \rho.$$

函数 F 具有 $F_{\rho}(A, -Z) = F_{\rho}(A, Z)$, $F_z(A, -Z) = -F_z(A, Z)$ 的性质,在 $Z \geq 0$ 时的表达式为

$$F_{\rho}(A, Z) = \int_0^{\pi} [R + \cos\theta \ln(R + A - \cos\theta)] \cos\theta d\theta$$

$$F_z(A, Z) = \int_0^{\pi} \left\{ Z \ln(R + A - \cos\theta) + \frac{1}{2} \cos\theta \ln \frac{R - Z}{R + Z} - \sin\theta \arctg \frac{Z(A - \cos\theta)}{R \sin\theta} \right\} d\theta$$

对函数 F 中的瑕点转移后,有如下表达式

$$F_{\rho}(A, Z) =$$

$$\begin{cases} \int_0^{\pi} [R + \cos\theta \ln(R + A - \cos\theta)] \cos\theta d\theta & (Z > 0 \text{ 或 } A > 1, Z = 0) \\ -1.042\,260\,18\cdots & (A = 1, Z = 0) \\ -\frac{\pi}{4}(1 + \ln 4) + \int_0^{\pi} (R + \cos\theta \ln \frac{R+1+A}{R+1-A}) \cos\theta d\theta & (A < 1, Z = 0) \end{cases}$$

$$F_z(A, Z) = \omega(A) + \int_0^{\pi} \left\{ Z \ln(R + A - \cos\theta) - \cos\theta \ln(R + Z) - \sin\theta \arctg \frac{Z(A - \cos\theta)}{R \sin\theta} \right\} d\theta$$

其中

$$\omega(A) = \begin{cases} -\frac{\pi}{2} A & A \leq 1 \\ -\frac{\pi}{2A} & A > 1 \end{cases}$$

对称轴上($\rho=0$)的磁感应强度由下式确定

$$B_z(0, z) = \frac{\mu_0 J}{2} \left\{ (b-z) \ln \frac{a_2 + [a_2^2 + (b-z)^2]^{1/2}}{a_1 + [a_1^2 + (b-z)^2]^{1/2}} + (b+z) \ln \frac{a_2 + [a_2^2 + (b+z)^2]^{1/2}}{a_1 + [a_1^2 + (b+z)^2]^{1/2}} \right\}$$

$$B_{\rho}(0, z) = 0$$

以上各式中: $2a_1$ 、 $2a_2$ 分别为线圈的内径和外径; $2b$ 为线圈长度; B_{ρ} 、 B_z 和 F_{ρ} 、 F_z 分别为函数 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{F}$ 的径向和轴向分量; ρ 、 z 分别为径向和轴向坐标; μ 为磁导率; J 为线圈电流密度; θ 为轴对称柱面

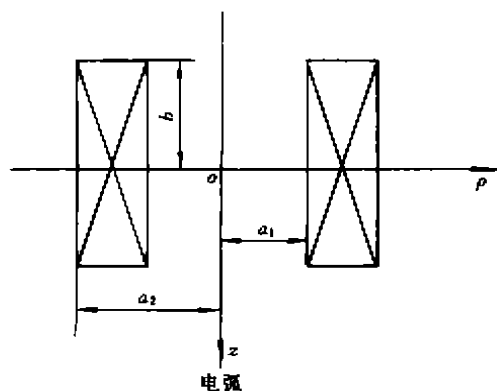


图3 TIG焊线圈坐标系选取示意图

坐标系下空间任意点与场源(线圈内)所在轴向界面的旋转夹角.详见文献[6].

2.3 TIG焊外加间歇交变纵向磁场的计算程序

由于采用无限点的单积分数学模型,为了保证磁场计算值具有较高的精度,本文选用稳定性好、方法简炼、自动积分和易控制误差的龙贝格求积法,使用FORTRAN语言,编制了模块化结构的TIG焊外加间歇交变纵向磁场计算程序,程序逻辑框图如图4所示.对于不锈钢1Cr18Ni9Ti的外加间歇交变纵向磁场TIG焊情况,该数学模型与数值计算方法具有模型简单、计算速度快和精度高等特点.

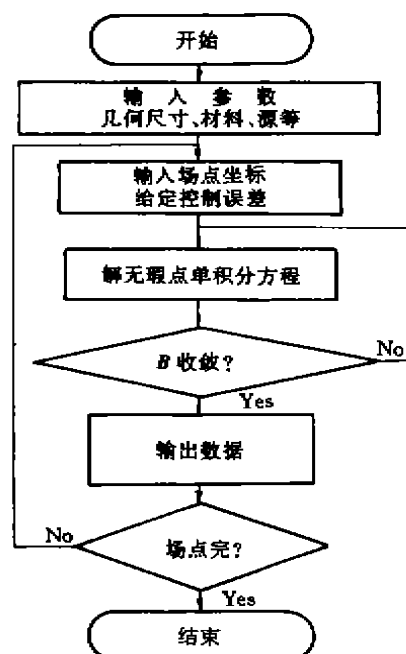
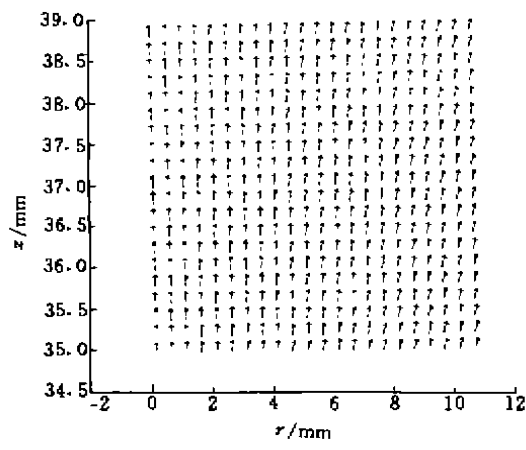


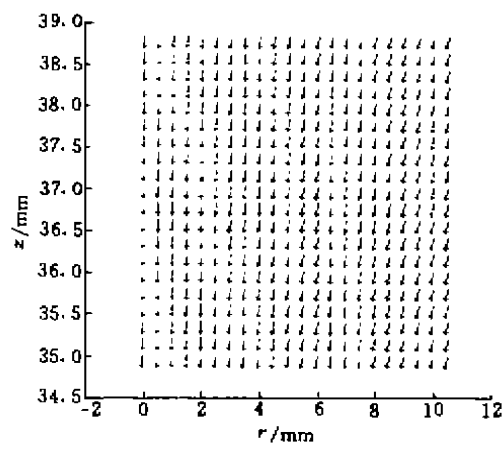
图4 TIG焊外加磁场计算程序框图

3 TIG焊外加间歇交变纵向磁场的结果分析与试验验证

根据焊接的实际情况,本文以电弧区域($35\text{ mm} \leq z \leq 38\text{ mm}$, $0 \leq r \leq 10\text{ mm}$)的磁场分布为主要讨论对象.图5为外加间歇交变纵向磁场 TIG 焊电弧区域的磁感应强度矢量分布图,图5a为励磁电流正向脉冲作用,图5b为励磁电流负向脉冲作用.



(a)正向脉冲作用



(b)负向脉冲作用

图5 电弧区域的磁感应强度矢量分布图

从图5可见,对称轴 z 上各点的 B 矢量方向与 z 轴平行,均无横磁分量,磁感应强度的大小与离开钨极(阴极)的距离成反比;在非对称轴上各场点的 B 均有横磁分量,离对称轴(电弧中心轴)越远,磁感应强度矢量与对称轴的夹角越大,横磁分量所占的比例越高,磁场的均匀程度越低,如图6所示.图5表明,在正脉冲与负脉冲励磁电流作用下,磁场的区别仅在于改变场点的磁感应强度矢量方向.显而易见,当励磁电流处于脉冲休止期时,空间磁感应强度为0.

图6为在 $z = 35\text{ mm}$ 的横截面上,纵磁分量与总磁感应强度矢量的夹角沿径向的变化曲线;图7为在 $z = 35\text{ mm}$ 的横截面上,场点磁感应强度的横

磁分量与纵磁分量之比率沿径向的变化曲线.由此可见,由单个轴对称空心圆柱线圈产生的 TIG 焊外加磁场不可能为单一、均匀的纵向磁场,其横磁分量所占的比例较大.因此,在分析外磁场对 TIG 焊的影响时,不能忽视横磁分量的作用而简单地将其作为纵向匀强磁场进行研究.

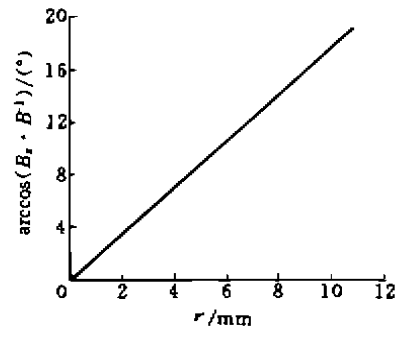


图6 磁感应强度与 z 轴的夹角沿径向的变化规律

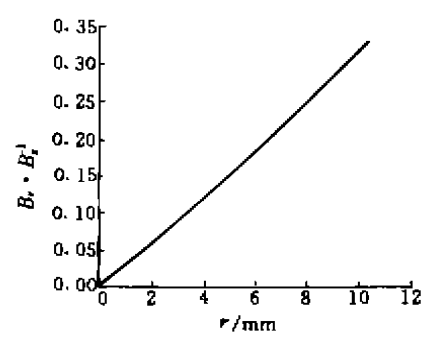


图7 横磁与纵磁之比率沿径向的变化规律

本文采用 CT3-A 型特斯拉计测量了轴对称空心圆柱线圈在恒定励磁电流(直流)作用下场点的磁感应强度,如表1所示,计算值与测量值具有较好的一致趋势.

表1 励磁电流为1 A(DC)时场点磁感应强度 B 的计算值与测量值

坐标(r, z)/mm	(0, 22)	(0, 27)	(5, 27)	(5, 32)	(10, 32)
$B_{\text{测量}}/\text{mT}$	3.18	2.50	2.49	1.89	1.78
$B_{\text{计算}}/\text{mT}$	3.194	2.510	2.483	1.871	1.762

4 结 论

(1)本文采用无限点单积分磁场的数学模型,实现了不锈钢1Cr18Ni9Ti外加间歇交变纵向磁场
(下转第74页)

最大,而后,随着S含量的继续增加,表面速度奇异峰值又逐渐减小.当 $w(S)=0.030\%$ 时,整个熔池表面被向内流动的流体所占据,熔池表面温度分布由中心向边缘缓慢降低,不会出现温度跃变,Marangoni力的峰值消失,奇异表面速度也随之消失.

3 结 论

(1)Fe-Cr-Ni-S系中,表面活性元素S会使焊接熔池表面上的Marangoni力出现最大值.S含量增大时,Marangoni力减小,Marangoni力最大值对应的温度增大.

(2)当 $w(S)<0.030\%$ 时,在Marangoni力的诱导下,熔池内出现反向的流体环路,它们具有不同的温度,并在熔池表面上逆向而流,相遇处Marangoni力最大,在该部位引发产生表面速度奇异峰值.

(3)Marangoni力诱发的表面速度奇异峰值所在部位随S含量的增加由边缘移向中心.最大速度奇异峰值达 2.9 m/s .随S含量进一步增加,速度奇异峰值又逐渐减小,乃至消失.

参考文献:

- [1] Hsie S S, Wen M Y. Numerical computation of thermocapillary-driven convection in an open cylindrical cavity with different aspect ratios. *Int J Heat & Mass Transfer*, 1993, 36(18): 4 351~4 363.
- [2] Keller J R, Bergmen T L. Thermocapillary cavity convection in wetting and nonwetting liquids. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 1990, 18(1): 33~49.
- [3] Block-Bolten A, Eagar T W. Metal vaporization from weld pools. *Metall Trans B*, 1984, 15B(6): 461~467.
- [4] McNallan M J, Debroy T. Effect of temperature and composition on surface tension in Fe-Ni-Cr alloys containing sulfur. *Metall Trans B*, 1991, 22B(8): 557~560.
- [5] 雷永平.焊接熔化与凝固过程数值模拟:[博士学位论文].西安:西安交通大学机械工程学院,1994.
- [6] Lei Y P, Shi Y W. Numerical treatment of the boundary condition and source terms on a spot welding process with combining buoyancy-Marangoni driven flow. *Numerical Heat Transfer, Part B*, 1994, 26(4): 455~471.

(编辑 葛赵青)

(上接第69页)

TIG焊外磁场分布的数值计算.该方法具有模型简单、计算速度快和精度高的特点,为深入研究外加磁场对TIG焊的影响打下了良好的基础.

(2)本文分析了TIG焊外加间歇交变纵向磁场的分布与变化规律,认为单个轴对称空心圆柱线圈产生的纵向磁场在电弧区域内的分布并不均匀,具有横磁分量;随场点远离对称轴和线圈端面,其磁感应强度不断衰减;同一横截面中,横磁分量与纵磁分量的比率随着径向距离的增大而增大.

(3)在电弧区域内,由于横磁分量所占的比例较大,在分析外磁场对TIG焊的影响时不能忽视横磁分量的作用,不能简单地将其作为纵向匀强磁场进行研究.

致谢 本文得到了焊接研究所贾昌申教授、薛锦教授的指导,电器专业王仲奕博士的帮助,材料成形专业林元航、霍泽人、倪晓俊和吕海红同学的支持,特

此一并感谢!

参考文献:

- [1] 贾昌申,殷威青.纵向磁场中的焊接电弧行为.西安交通大学学报,1994,28(4): 7~13.
- [2] Malinowski M, Ouden G, Vink P W J. Effect of electromagnetic stirring on GTA welds in austenitic stainless steel. *Welding Research Supplement*, 1990, (2): 52~59.
- [3] Villafuerte J C, Kerr H W. Electromagnetic stirring and grain refinement in stainless steel GTA welds. *Welding Research Supplement*, 1990, (2): 1~13.
- [4] 樊明武,颜威利.电磁场积分方程法.北京:机械工业出版社,1988. 1~68.
- [5] Sabonnadiere J C, Konrad A. Computing EM fields. *IEEE Spectrum*, 1992, 11: 52~56.
- [6] 雷银照,励庆孚.螺线管线圈磁场的单积分计算公式.西安交通大学学报,1989,23(增1): 109~114.

(编辑 葛赵青)