

GTAW 电弧电势、电流密度和电磁力的数值模拟

杜华云¹, 樊丁², 王文先¹, 卫英慧¹, 许并社¹

(1.太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2.兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要:基于自由燃烧的 GTAW 电弧建立了二维稳态的轴对称模型。在研究了电弧的传热和流体流动以及电弧温度场和速度场的同时,按照电磁场理论计算了电弧电势场、电流密度和电磁力在模型空间的分布。方程的求解采用的是以 SAMPLE 算法为基础编写的通用热流计算软件——PHOENICS。计算结果与文献结果相一致,验证了电弧理论的基本观点。

关键词:GTAW 电弧;数值模拟;电弧电势;电流密度;电磁力

中图分类号:TG403 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2303(2006)09-0050-04

Numerical simulation of profiles of potential, current density and electromagnetic force in GTAW-arc

DU Hua-yun¹, FAN Ding², WANG Wen-xian¹, WEI Ying-hui¹, XU Bing-she¹

(1.College of Materials Science and Engineering, Taiyuan Univ. of tech., Taiyuan 030024, China; 2.State Key Laboratory of Gansu New Non-ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In this work, a steady two-dimensional(2D) axisymmetric free burning GTAW arc model has been developed. On the base of investigated velocity and temperature profiles of the arc, the distribution of potential, current density and electromagnetic force has been simulated through the theory of electromagnetism. The control equations was solved using a general thermofluid-mechanics software, PHOENICS, which is based on the SAMPLE algorithm. The simulated results of this work are in good agreement with classical theory and calculated results by others.

Key words: GTAW-arc; numerical simulation; potential; current density; electromagnetic force

0 序言

数值模拟是研究 GTAW(Gas Tungsten Arc Welding)电弧物理特性的有效方法。许多学者较早对电弧的等离子体行为进行了模拟^[1-2],最近一些研究不断改进,而且考虑的因素越来越全面。J.Haidar 建立了电弧的非平衡模型,分别考虑了等离子体和重离子能量平衡的影响^[3];J.J.Lowke 和 L.Sansonnens 等计算了双极扩散作用下自由燃烧模型^[4],Manabu Tanaka, Masao Ushio 和武传松对于自由燃烧氩弧的

阳极边界层做了一维尺度的分析,研究了电子密度梯度的影响^[5]。杜华云和张瑞华用 PHOENICS(Parabolic hyperbolic or elliptic numerical integration code series)软件模拟了电弧温度场流场,焊接熔池的特性和焊接过程非稳态的熔池温度场分布^[6-8]。

PHOENICS 软件是大型通用商业热流计算软件,采用 SIMPLEST 算法来求解其代数方程组。本研究利用 PHOENICS 软件,并对其进行了二次开发,编制 ground 子程序,添加了边界条件和源项。对自由燃烧的 GTAW 电弧等离子体行为进行数值模拟。在二维坐标下,在计算出电弧温度场和流场的同时,通过欧姆定律和安培定律计算了电弧区域的电流密度和自感应电磁场,从麦克斯韦方程得出了电磁力的分布。

收稿日期:2006-01-28;修回日期:2006-08-08

基金项目:教育部春晖计划(A25-013)

作者简介:杜华云(1976—),男,山西临汾人,讲师,博士,主要从事焊接物理、焊接工艺以及纳米材料等方面研究工作。

1 数学模型

1.1 基本假设

电弧是轴对称的,本计算将沿用文献[6]给出的假设。

1.2 控制方程^[9-10]

流体的流动连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\rho \frac{dV}{dt} = -\nabla P + \eta \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T - S_R + \frac{J^2}{\sigma} \quad (3)$$

电流连续方程

$$\frac{\partial}{\partial z} (\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\sigma \cdot r \frac{\partial \varphi}{\partial r}) = 0 \quad (4)$$

安培定律

$$B = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (5)$$

欧姆定律

$$J_r = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (6)$$

$$J_z = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (7)$$

麦克斯韦方程

$$F_r = J_z \times B \quad (8)$$

$$F_z = J_r \times B \quad (9)$$

式中 ρ 为密度; \vec{V} 为速度; η 为动力粘性系数; c_p 为比热容; t 为时间; k 为导热系数; T 为温度; P 为压力; σ 为导电率; B 为自感应磁场强度; φ 为电势; F_r 和 F_z 分别是体积力,也就是电磁力在径向和轴向上的分量; J 为电流密度; S_R 为辐射热损失。

2 边界条件和数值计算

二维的自由燃烧电弧如图 1 所示,电极锥角为 60° , $ABCDEA$ 是求解区域。边界条件和数值计算的过程与文献[6]相同。

3 计算结果与讨论

计算得出的电弧温度场和流场与实测结果以及其他人的计算结果相吻合,参看文献[6]。

通过在模型上相应的电极位置对电流密度的设定,计算出电势的分布,如图 2 所示。考虑到计算条件是直流正接,电极电势最低,试板接地为 0 V 。

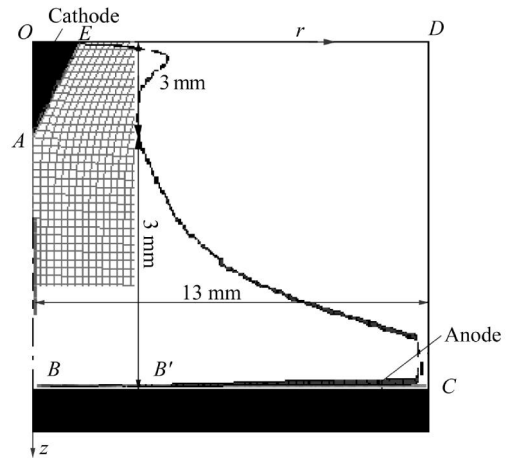


图 1 二维自由燃烧的电弧空间

Fig.1 Domain of free burning arc in 2D

在靠近电极附近,较密集的等势线说明了较陡的阴极压降,电极的尖端电势为 -13.6 V ,这个电压降与通常 GTAW 相应条件下的电弧电压相吻合。

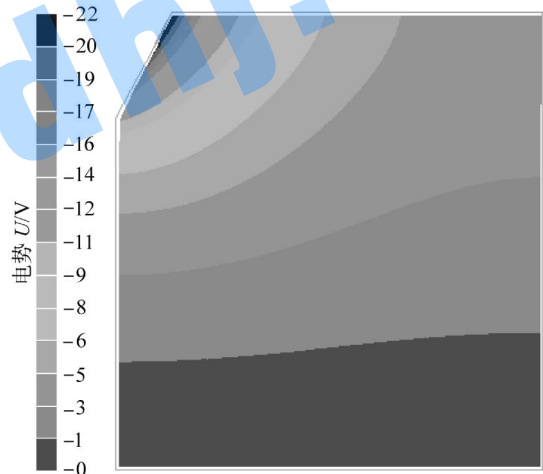


图 2 电弧电势分布

Fig.2 Distribution of arc potential

计算所得电弧自感应电磁场的磁场强度分布如图 3 所示。由图可知,在靠近电极右下方的磁场强度最大,计算结果最大值为 $0.039\text{ N/A} \cdot \text{m}^{-1}$,说明在电极尖端附近一个环状的区域有较高的磁场强度。图中从电极尖端沿着轴向到试板,磁场强度降低;从电极尖端沿着电极向上磁场强度也是降低。

图 4 和图 5 分别是电弧的径向电流密度和轴向电流密度,它们的分布具有相同的趋势,在靠近电极尖端的附近电流密度很大,远离电极尖端电流密度的数值随径向和轴向依次减少。图 6 为文献[11]给出的电弧轴向的电流密度线图。比较图 5 和图 6,两者的弧柱区电流密度轮廓很相似。文献[11]给出了 $200 \sim 6000\text{ A/cm}^2$,即 $2\text{E}+6 \sim 6\text{E}+7\text{ A/m}^2$ 的电流密度

值的范围,与计算结果 $5E+5\sim 6.6E+7 \text{ A/m}^2$ 吻合的。

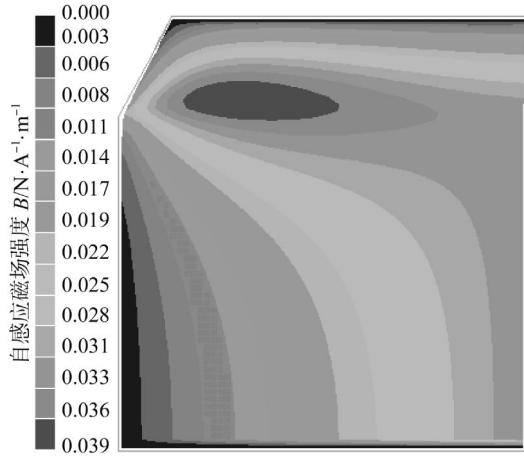


图 3 自感应的磁场分布

Fig.3 Distribution of self-induced magnetic field

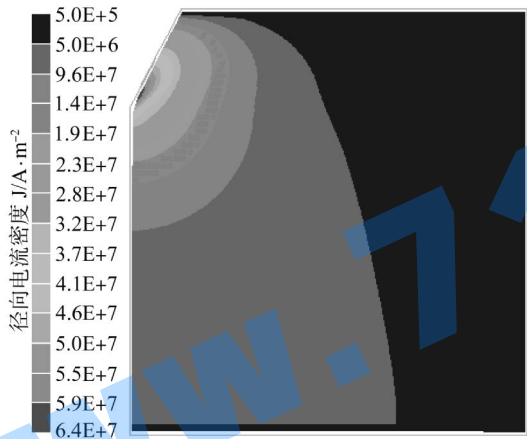


图 4 径向电流密度

Fig.4 Distribution of radial current density

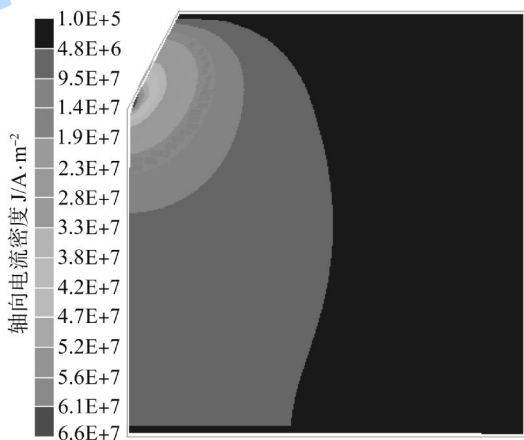
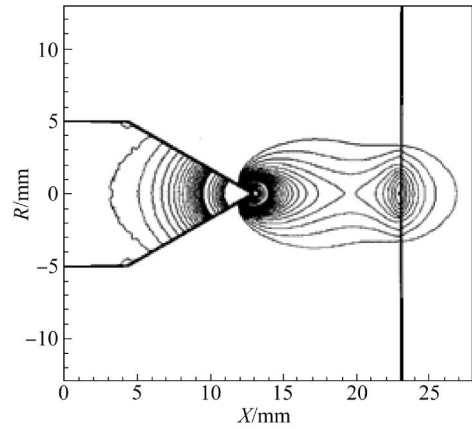


图 5 轴向电流密度

Fig.5 Distribution of axial current density

电磁力的计算结果如图 7、图 8 所示,轴向的电磁力为正值,表示它们的方向沿轴向坐标轴向下;



等值线从外到内依次为 $200\sim 2\,000 \text{ A/cm}^2$; 间隔 100 A/cm^2 ; $2\,000\sim 6\,000 \text{ A/cm}^2$; 间隔 500 A/cm^2 。

图 6 弧电流 $I=200 \text{ A}$ 时的电弧等轴向电流密度线图

Fig.6 Arc isometry to current density graph when $I=200 \text{ A}$

径向的电磁力为负值,表示它们的方向逆着径向坐标轴向左,体现了电磁力一方面加速电弧等离子体,一方面压缩等离子体。两个方向的电磁力均是在电极尖端的侧面呈现出最大值,轴向为 $1.7E+6 \text{ N}$,径向为 $1.33E+6 \text{ N}$,说明电磁力在这个位置的作用最强,与在这个地方电弧的自感应磁场强度最高相关。电磁力的变化趋势也是沿着坐标轴的轴向和径向的正向逐渐减小。需说明的是,电磁力加载到电弧流场的动量方程中时是按照体积力计算的。

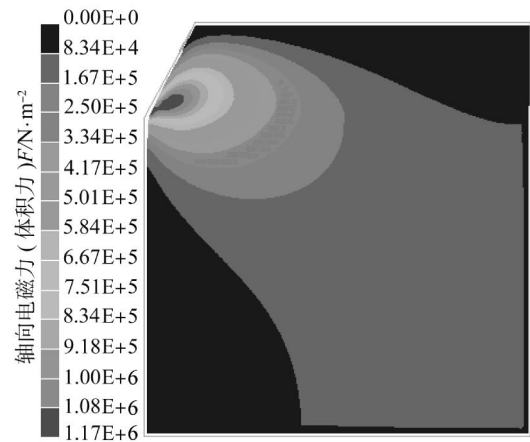


图 7 轴向电磁力

Fig.7 Distribution of axial electromagnetic force

4 结论

在建立 GTAW 电弧自由燃烧状态的数学模型的基础上,用较为简捷的方式对连续、动量和能量方程在电弧区域进行了计算。通过欧姆定律和安培定律计算了电流密度和自感应电磁场,从麦克斯韦方程得出了电磁力。计算结果与文献结果相一致,验

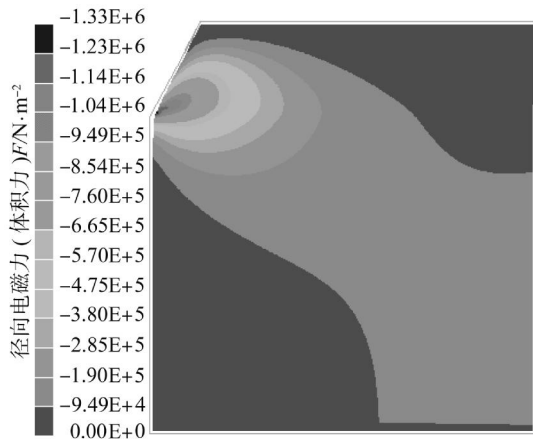


图 8 径向电磁力

Fig.8 Distribution of axial electromagnetic force

证了电弧理论的基本观点。

参考文献:

[1] Hsu K C, Etemadi K, Pfender E. Study of the free-burning high-intensity argon arc[J]. Appl. Phys., 1983(54): 1293-1301.
 [2] Masao Ushio, .Mathematical Modeling of Heat Transfer of

Welding Arc[J]. Transactions of JWRI, 1982, 11(1): 7-15.
 [3] Haidar J. Non-equilibrium modeling of transferred arcs[J]. Phys D: Appl. Phys., 1999(32): 263-272.
 [4] Menart J, Mallk S, Lin L, et al. Coupled radiative, flow and temperature-field analysis of a free-burning arc[J]. Phys D: Appl. Phys., 2000(33): 257-269.
 [5] Manabu Tanaka, Masao Ushio, chuan song wu, One demen-sional analysis of the anode boundary layer in free-burring argon arcs[J]. Phys D: Appl. Phys., 1999, 32: 605-611.
 [6] 杜华云, 樊 丁, 张瑞华. GTA 电弧温度场流场数值计算[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(5): 24-27.
 [7] 张瑞华, 樊 丁, 杜华云. GTA 焊接熔池特性的数值模拟[J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(5): 21-23.
 [8] 张瑞华, 樊 丁, 杜华云. PHOENICS 在焊接数值模拟中的应用[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(4): 26-28.
 [9] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
 [10] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.
 [11] 李和平, 陈 熙. 自由燃烧电弧中传热与流动的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(1): 78-81.

Page 6

表 1 不同点焊规范下的分形维数

Tab.1 Dementions in different welding parameters

序号	焊接规范			熔核情况	熔核率 /%	电压曲线	分形特征值
	I/kA	F/kN	t/ms				
1	10	1.8	80	未熔核	0	A	1.46
2	16	1.8	80	小熔核	30	B	1.33
3	20	1.8	80	合格	86	C	1.15
4	24	1.8	80	过热	0	D	1.83

极电压信号曲线的非线性程度增大,使得曲线的复杂程度加大,分形维数大;而未熔核时,工件间的氧化膜破裂,工件有局部的接触,未能形成熔核,流经熔核区的电流密度小而且比较分散,由于未形成熔核并未大量破坏氧化膜,在工件的不同接触面产生有差热膨胀,工件振动频率较小,能量分散,引起非线性的电极电压信号曲线混乱程度较大,分形维数特征值相对较高;小熔核以及合格熔核时,工件表面氧化膜完全被破坏,电流密度大,形核能量集中,电极电压信号主要因工件熔化产生,工件体电阻熔化吸收大量热能,非线性程度较小,信号混乱程度低,分形维数特征值较小。

4 结论

(1)提出了用分形维数来定量描述非线性电极电压信号的解决方案,并取得了一些有益的结果。

(2)提取的电压信号特征量可以有效表征不同焊接规范和焊接条件下的电极电压信号曲线,并能直观地反映出焊接规范和焊接条件变化对焊点熔核形成的影响。

(3)弥补了以往电极电压信号定量描述点焊质量的不足,为铝合金点焊质量检验提供了一种新的解决方案,具有一定理论研究意义和实际应用价值。

参考文献:

[1] Miller W S, Zhang L, Bottenna J, et al. Recent Development in Aluminum Alloys for the Automotive Industry[J]. Materials Science and Engineering, 2002(A280): 27-49.
 [2] Rinse Ikeda. Resistance Spot Weldability and Electrode Wear Characteristics of Aluminium Alloy sheets[J]. Welding in the World, 1998(41): 492-498.
 [3] 石博强, 申焱华. 机械故障诊断的分形方法[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
 [4] 孙博文. 分形算法与程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
 [5] 冯志刚, 周宏伟. 图像的分形维数计算方法及其应用[J]. 江苏理工大学学报, 2001, 22(6): 92-95.
 [6] 王炳雪, 史忠科, 吴方向. 时间序列曲线盒维数的一种快速算法[J]. 系统工程, 2000, 18(4): 68-72.
 [7] 邓 焱, 王 磊. LabVIEW 7.1 测试技术与仪器应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992.
 [8] 史 涛, 罗 震, 胡绳荪. 基于 LabVIEW 的铝合金点焊数据采集系统的设计[J]. 电焊机, 2005, 35(9): 32-34.