

钨极氮弧焊电弧数值模拟

李 军,王笑世

(中石油第二建设公司,甘肃 兰州 730060)

摘要:与氩弧比较,氮弧具有更优良的高热特性。针对自由燃烧的氮气电弧建立了二维稳态的轴对称模型,研究了电弧的传热传质行为。以电弧电流 200A,弧长 10mm 的自由燃烧氮气电弧为研究对象,采用以 SAMPLEST 算法为基础编通用流体计算软件 PHOENICS 进行了数值模拟,并与氩气电弧的模拟结果进行了对比,发现氮气电弧截面收缩更小,具有更高的电弧温度,是一种更高能量密度的焊接电弧。

关键词:钨极氮弧焊;电弧;温度场;流场;数值模拟

中图分类号: TG402

钨极氮弧焊由于其高热特性,在焊接厚壁紫铜时有一定的应用。氮气保护 TIG 电弧有其独特的性质,是一种有发展潜力和应用前景的热源。但现阶段对它的行为特征的研究还很少,数值模拟的研究也很少报导。与其他焊接电弧一样,氮气电弧的行为特征(包括电弧压力、电流密度和温度)直接影响熔池表面的热流分布和电流密度分布,从而影响熔池的形状,对焊缝的成形以及焊缝质量产生影响。由于实际焊接时,高温、高电流密度和强烈弧光的干扰,很难通过实验直接观测到电弧的行为特征。对此,本文采用数值模拟的方法对钨极氮弧焊进行了研究,建立了二维稳态的轴对称模型,研究了电弧的传热传质行为,这对于加深对以氮气作为保护气体的焊接电弧的理解以及指导试验研究和工程实践都具有非常重要的意义。

1 数学模型

1.1 基本假设

电弧是轴对称的;计算将采用柱坐标系,弧长取 10 mm,电流取 200A;电弧等离子体的主体区域处于局部热平衡状态;等子体具有光学薄层特性;流体假设为层流;气体浮力忽略不计。

1.2 控制方程

质量连续方程

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho \cdot r v) = 0 \quad (1)$$

u, v 分别是等离子体轴向和径向的速度。

动量守恒方程的径向表达式

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$= F_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

轴向表达式

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} \right) = F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

能量方程

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + Q \quad (4)$$

$$Q = \frac{J_r^2 + J_z^2}{\sigma} + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \left(J_r \frac{\partial T}{\partial z} + J_z \frac{\partial T}{\partial r} \right) - S_r \quad (5)$$

式中, ρ :密度; μ :粘性系数; c_p :比热; k :导热系数; T :温度; P :压力; k_B :波尔兹曼常数; F_r 和 F_z 分别表示体积力,也就是电磁力在径向和轴向上的分量; Q :热源项; S_r :辐射热损失。

电弧的控制方程中的电磁力是以 $J_z B_\theta$ 和 $-J_\theta B_z$ 的形式分别载入轴向和径向动量方程中的,电弧能量控制方程中焦耳热和电子运动引起的能量输送也包含了 J_r 和 J_z ,因此需要求解相应的电磁场方程。

电流连续方程

$$\frac{\partial}{\partial z}(\sigma \frac{\partial \phi}{\partial z}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\sigma \cdot r \frac{\partial \phi}{\partial r}) = 0 \quad (6)$$

其中 σ 为电导率, ϕ 为电势。

$$\text{麦克斯韦方程 } F = (\vec{j} \times \vec{B}) \quad (7)$$

欧姆定律

$$J_r = \sigma \frac{\partial \phi}{\partial r} \quad J_z = \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (8)$$

$$\text{安培定律 } B_0 = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_r r dr \quad (9)$$

上述热力学参数均来自于参考文献[13],其中 ρ, μ, c_p, k 作为温度的函数,均从一个大气压下对氮离子体详细的热力学计算和分析中得出。

1.3 边界条件

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。

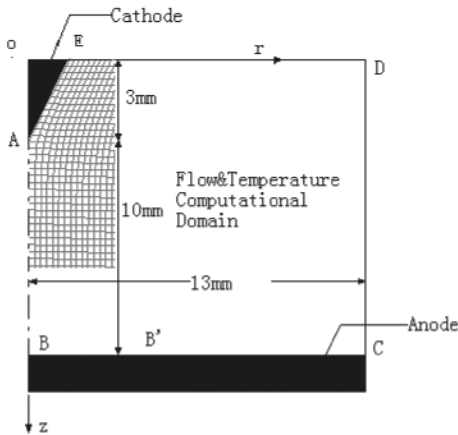


图1 二维自由燃烧的电弧空间

$$\text{在 AB 边界 } v = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

$$\text{在 BC 边界 } u = v = \varphi = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

$$\text{在 CD 边界 } v = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0, T = 3000K$$

$$\text{在 ED 边界 } v = \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, T = 3000K$$

$$\text{在 EA 边界 } u = v = 0, J_r = J_{\max} \exp(-br), T = 3000K$$

取 $J_{\max} = 1.4 \times 10^8 \text{ Am}^{-2}$, 常数 b 可由式 $I = 2\pi \int_0^{r_0} r J_r dr$ 得出。 r_0 取 3mm ^[2,3,7~9]。辐射热损失是温度的函数,根据文献[5]计算出辐射能密度,然后将其作为源项加入边界条件。

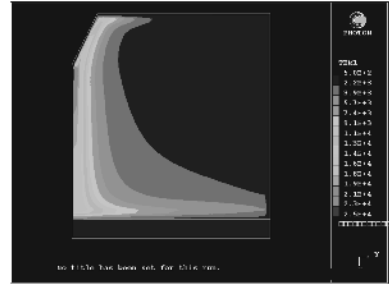
1.4 网格剖分与数值计算

采用了 PHOENICS (version 3.4) 对以上建立的数学模型进行求解,求解区域采用贴体坐标系, 60×60 网格剖分。当所有控制方程的参差继续下降,而所选用网格点处的流场速度值变化不大时(该收敛准则为 PHOENICS 软件的默认收敛准则),认为整个迭代过程已经收敛。

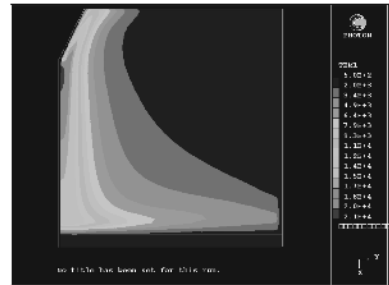
2 计算结果与讨论

图2为电弧温度场分布的计算结果。可以看

出,电弧在电磁力的作用下呈收缩态。与氩气电弧相比,氮气电弧的径向尺寸较小,电弧收缩使得电弧温度较高,达到 $25320K$,从而具有比氩气电弧更高的能量密度。这可能是因为氮气作为双原子气体,在电弧中所发生的解离吸热使得电弧收缩,从而使得电场增加、束流密度和焓值增加所致。电弧最高温度出现在电弧阴极前方,温度场从阴极区向阳极区逐步扩大,温度分布也逐渐平缓。轴向温度值随着离阴极距离的增大而递减。



(a) 氮弧焊



(b) 氩弧焊

图2 电弧温度场分布

图3为电弧轴向的速度场的计算结果。等离子体在自感应电磁场中受到向阳极试板的电磁力,磁场强度在阴极尖端附近最大,速度场强度在电弧阴极与阳极间最大,远离这个对称轴则流速逐渐降低。在电弧阴极的侧面,速度是与坐标轴是反向的,因为电弧的高温区域出现在阴极前端,自然对流加上电磁力使得该区域的速度呈现负值。图4为电弧流场的流态,箭头方向为流体的流动方向。在阴极区周围的层流性不好,电极端头附近的少量气流是沿着电极向上流动,形成一个漩涡流。

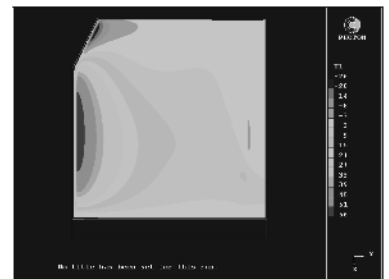


图3 电弧轴向速度场分布

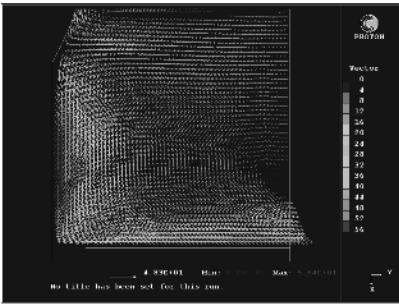


图 4 电弧流场流态

图 5 为电弧压力场的计算结果,电弧的阳极区和阴极区分别呈现较大的压力分布,而远离这两个区域,压力相应的减小。

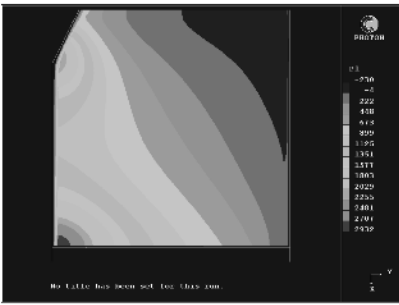


图 5 电弧压力场分布

3 结论

1) 在建立了 GTAW 电弧自由燃烧状态的数学模型的基础上,利用 PHOENICS 软件并对其进行了二次开发,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。

2) 通过计算,给出了自由燃烧 TIG 电弧的温度场,流场和压力场的分布情况。分析表明本计算结果与文献测量结果吻合良好。

3) 计算结果表明,PHOENICS 对电弧温度场流场的数值模拟是可靠的。

参考文献:

[1] Masao Ushio and Fukuhisa Matsuda, Mathematical Modeling of Heat Transfer of Welding Arc. [J] Transactions of JWRI, Vol. 11 No. 1, 1982.

- [2] L Sansonnens, J Haidar and J J Lowke, et al. Prediction of properties of free burning arcs including effects of ambipolar diffusion [J]. Phys D: Appl. Phys. 33, 148 - 157(2000).
- [3] J Menart, S Mallk and L Lin, et al. Coupled radiative, flow and temperature - field analysis of a free - burning arc [J]. Phys D: Appl. Phys. 33, 257 - 269(2000).
- [4] Ding Fan, Masao Ushio and Fukuhisa Matsuda, Numerical Computation of Arc Pressure Distribution, [J] Transactions of JWRI, Vol. 15 No. 1, 1996.
- [5] Masao Ushio, Ding Fan and Manabu Tanaka, Contribution of Arc Plasma Radiation Energy to Electrodes, [J], Transactions of JWRI, Vol. 22 No. 2, 1993.
- [6] 樊丁, 陈剑虹. TIG 电弧传热传质过程的数值分析 [J]. 机械工程学报, 1998, 34(2): 39-45.
- [7] P Freton, J J Gonzalez and A Gleizes, Comparison between a two - and a three - dimensional arc plasma configuration, [J]. Phys D: Appl. Phys. 33, 2442 - 2452 (2000).
- [8] TANAKA Mahabu, TERASAKI Hidenori, Ushio Masao and John J LOWKE, Steady state calculations of stationary gas tungsten arc welding from a unified arc - electrodes model. [J] Transactions of JWRI, Vol. 31 No. 1, 2002.
- [9] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
- [10] 雷永平, 史耀武, 顾向华, 等. GTA 焊接电弧与熔池系统的双向耦合数值模拟 [J]. 金属学报, 2002, 37(5): 537-542.
- [11] 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.
- [12] Haddad G N, Farmer A J D, Measurement of arc temperature distribution. Weld. J., 1985, 64(9): 226-232.
- [13] J. F. Lancaster, 《The Physics of Welding》, Printed in Great Britain by A Wheaton & Co. Ltd Exeter, 1984.
- [14] 董红刚, 高洪明, 吴林. 固定电弧等离子弧焊接热传导的数值计算 [J]. 焊接学报, 2002, 23(4): 24-26.
- [15] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安交通大学出版社, 1995.