

基于 ANSYS 的 TIG 焊接电弧 数值模拟研究

朱加雷¹, 焦向东¹, 俞建荣², 蒋力培¹, 周灿丰², 薛 龙¹

(1.北京石油化工学院 光机电装备技术北京市重点实验室, 北京 102600; 2.北京石油化工学院 机械工程学院, 北京 102600)

摘要:焊接电弧的数值模拟是一个复杂而重要的工程。通过理论假设,对 TIG 焊接电弧的数学模型进行了简化,成功地建立了实用的焊接电弧瞬态温度分布数学模型。采用有限元分析软件 ANSYS,探索了电弧模拟分析中热、电磁、流场和温度场的耦合理论;采用过渡网格划分的非均匀网格划分方式,在保证计算精度的基础上,有效地缩短了模拟计算的时间,电弧温度场、电磁场的模拟计算结果与理论值和实验值基本吻合。

关键词: TIG 焊; 焊接电弧; 数值模拟; ANSYS

中图分类号: TG403

文献标识码: A

文章编号: 1001-2303(2009)06-0026-04

Research on TIG welding arc with numerical simulation by using ANSYS

ZHU Jia-lei¹, JIAO Xiang-dong¹, YU Jian-rong², Jiang Li-pei¹, ZHOU Can-feng², XUE Long¹

(1.Opto-Mechatronic Equipment Technology Beijing Area Major Laboratory, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102600, China; 2.School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102600, China)

Abstract: Numerical simulation for welding process is a very complicated and important work. The numerical model of the TIG arc was simplified on base of some theoretical hypothesis, and the mathematic model of transient thermal process was established successfully. By using FEA software ANSYS, the coupling theory of heat, electromagnetism, fluid field and temperature field were also researched. Using transition mesh and invective mesh mode, the simulation time was shortened successfully. The calculation result of simulation for arc's temperature field, electromagnetism field accord with theory results and experiment results on the whole.

Key words: TIG welding; welding arc; numerical simulation; ANSYS

0 前言

焊接电弧的热能特性和力学特性直接影响着熔池和母材表面的热流分布、熔池的热传递和熔池内液态金属的流动,而熔池中液态金属的流动又影响着熔池的几何形状,从而影响焊缝成形及质量,影响焊接接头的力学性能。由于实际焊接条件的限制,通过试验观测焊接电弧行为和熔池中流体的流动状态是相当困难的。随着计算机技术的发展,数值分析对于理解整个焊接过程起着十分重要的作用。

TIG 焊(钨极氩弧焊)的电弧长度稳定,焊接质量较高,并且运用 TIG 焊对电弧进行理论分析的影响因素较少^[1],因此以 TIG 焊电弧作为研究对象,运用 ANSYS 数值模拟软件进行研究分析。

1 数学模型的建立

1.1 基本假设

根据磁流体动力学理论构建电弧数学模型。由于焊接电弧在稳态时,可以近似看作一个轴对称的呈钟罩状的热源,因此模拟采用两维的轴对称模型,将焊接试板的温度设定为一个固定值,也就是说不考虑熔池对电弧的影响。假定弧柱等离子体处于局部热平衡状态,电弧处于层流状态,等离子体

收稿日期:2008-03-19; 收稿日期:2009-02-10

基金项目:北京石油化工学院青年科研基金项目(N07-18)

作者简介:朱加雷(1981—),男,山东菏泽人,讲师,主要从事水下焊接技术及焊接自动化方面的研究工作。

是光学薄的,同时不考虑重力的影响。

1.2 基本方程

根据冶金传质、传热原理,焊接电弧统一的基本方程如下^[2-6]:

流体的流动连续方程为

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

式中 ρ 为材料密度; t 为时间; $\vec{V}$ 为各个方向的速度,稳态时左边第一项为零。

动量守恒方程为

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = -\nabla P + \eta \nabla^2 \vec{V} + \vec{J} \times \vec{B} + \rho \vec{g}$$

式中 P 为压力; η 为动力粘性系数; $\vec{J}$ 为电流密度; $\vec{B}$ 为电磁场强度;方程右边依次为压力梯度、粘性力、电磁力和重力。

能量守恒方程为

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T - \rho C_p (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{q} + \frac{J^2}{\sigma} + \phi_0$$

式中 C_p 为定压比热容; k 为导热系数;公式右边各项依次为传导的热量、对流热量、辐射热量、电阻热、化学热。

方程中等离子体热物理和电物理性质与温度密切相关^[7]。

2 模拟计算与结果分析^[8-9]

2.1 计算区域及网格划分

一般运用 ANSYS 进行计算的过程可分为三步:前处理、加载计算、后处理。选用间接法对焊接电弧进行计算,此方法是先分析温度场、电磁场,在此基础上,保存电磁场分析结果;再分析流场,如果流场结果不理想,不必再进行温度场分析,而只需修改性能参数和优化载荷,然后再进行温度场的迭代计算,可以节省大量的时间。

采用自下向上的建模方式。基于前面所述的 TIG 焊接电弧的假设,电弧是光学薄的并且轴对称的,所以可以将电弧简化为二维焊接模拟区域。对于焊接电弧温度场与电磁场的分析,不涉及阴极区域。取钨极尖端锥角为 60° ,弧长为 10 mm,钨极顶端半径为 0.5 mm,焊接电弧的模拟计算区域如图 1 所示。运用自由网格划分方式,进行非均匀网格的划分。网格划分结果如图 2 所示。

2.2 边界条件

采用热流密度施加焊接热源载荷,TIG 焊接电弧模拟计算边界条件如表 1 所示。

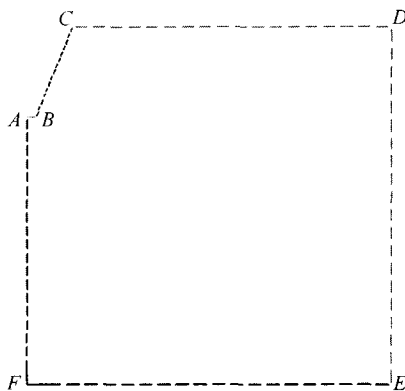


图 1 焊接电弧的模拟计算区域

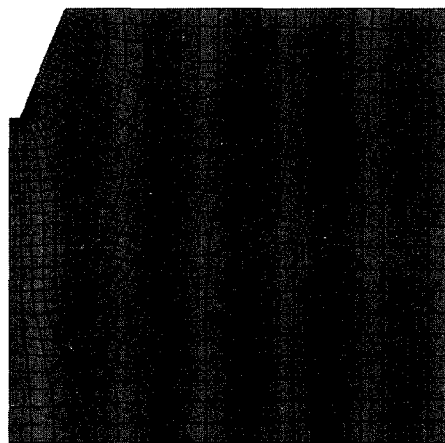


图 2 焊接电弧模拟区域的网格划分

表 1 电弧模拟计算边界条件

边界	u	v	T/K	φ
AB	$U=0$	$V=0$	20 000	无
BC	$U=0$	$V=0$	3 000	无
CD	$U=0$	$V=0$	1 000	$\frac{\partial \varphi}{\partial z}=0$
DE	$U=0$	$V=0$	1 000	$\frac{\partial \varphi}{\partial r}=0$
EF	$U=0$	$V=0$	5 000	$\varphi=0$
FA	$\frac{\partial u}{\partial r}=0$	$V=0$	$\frac{\partial T}{\partial r}=0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial r}=0$

边界条件加载结果如图 3 所示。图中阴极边缘实线为施加的电流密度值,各边界上均有的三角表示温度,点划线条为加载的热对流系数,阳极方块是电势为 0 的边界条件。采用程序自动选择求解器的方法进行求解计算。

2.3 结果验证

TIG 焊接电弧温度分布如图 4 所示。

用图 4 还原出的整个电弧形状如图 5 所示,图 6 是使用高速摄像设备拍摄的实际 TIG 焊接电弧

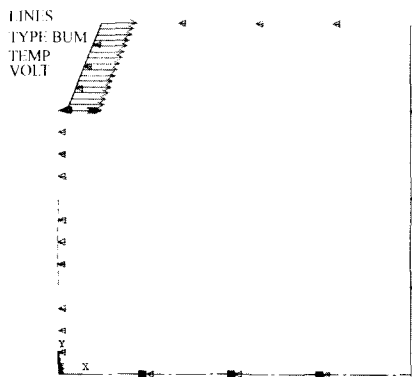


图 3 边界条件加载结果

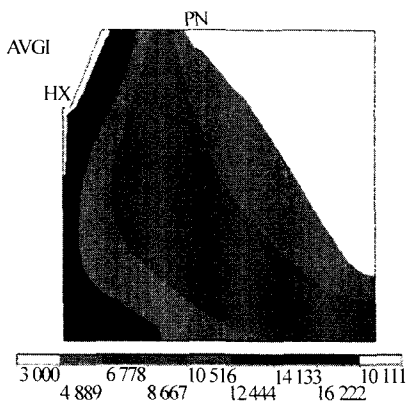


图 4 焊接电弧温度分布

形状。比较图 5 和图 6 可知,模拟电弧的形状与实际电弧的形状基本相符,都是呈倒置的铃形,或者说呈钟罩状。模拟的温度云图还能清晰看出电弧不同温度段的温度分布情况。焊接电极阴极尖端前沿温度最高,达到 20 000 K 以上,沿着阴极边缘向上,温度逐渐降低,但因降低幅度很小,所以在图形的颜色上没有表现出来,整个阴极的温度值都相对很大。沿弧柱向下,即从阴极区过渡到阳极,电弧形状逐步扩散开,温度逐渐降低,温度变化梯度减小,即图形中的温度分布趋势逐渐平缓。同一径向截面上,温度值随着远离弧柱中心线而减小。电弧在电磁力作用下呈收缩状态,这与 Haddad GN 的实测结果一致^[10]。

焊接电流为 200 A 情况下的电流密度矢量分布如图 7 所示,箭头的长短以及灰度表示电弧电流密度的大小,箭头的指向表示电弧的方向。由于按照正极性接法,焊接电流从阳极表面通过电弧空间流入阴极,然后则经过阴极斑点区流入阴极顶端。阳极的平均电流密度小于导电截面较小的阴极,因为由阳极向阴极斑点导电截面逐渐变小,温度逐渐变

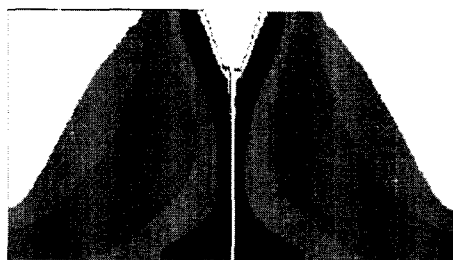


图 5 模拟的 TIG 焊接电弧温度

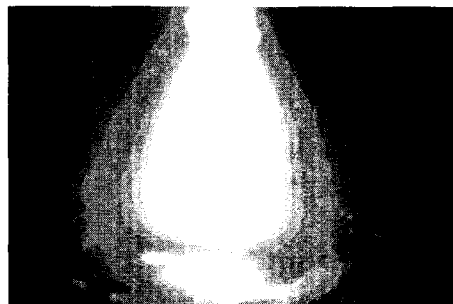


图 6 仪器拍摄的 TIG 焊接电弧

高,在阴极尖端处导电截面和温度都达到极值,在阴极尖端附近电流密度值最大。从图中可以直观的看出,电弧电流密度随着与阴极尖端距离的增大,箭头长度逐渐缩短,箭头灰度逐渐变浅,表示电流密度值逐渐减小。另外还可以看出,在电弧的同一截面上,随着径向距离的增大,电流密度也逐渐减小。

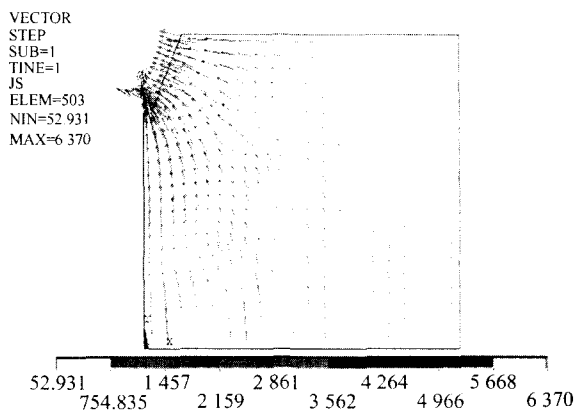


图 7 模拟电弧区域电流密度矢量分布

电弧区域热流量矢量分布如图 8 所示,图中箭头的方向同样表示热流量的流动方向,箭头的长短和疏密程度表示热流量的大小。从图中可以看出,焊接电弧区域中热流量的分布规律和电弧区域的电流密度分布规律基本相同,不过热流量方向是从阴极尖端逐渐流向阳极,由阴极尖端向阳极表面呈逐步减小的趋势,在阴极尖端处热流量值达到最大。

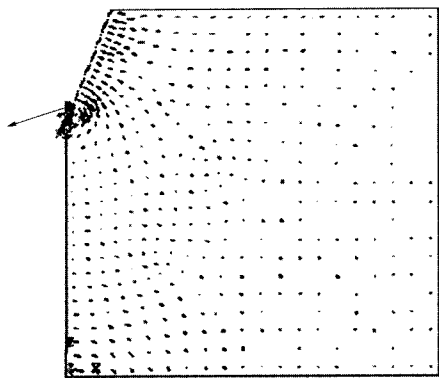


图 8 电弧区域热流量分布矢量

计算出的模拟区域热流梯度分布矢量如图 9 所示,从图中可以看出,热流梯度的分布与热流量的分布趋势基本相同,在阴极尖端热流梯度最大,此处热流量变化最快,越靠近阳极,越偏离弧柱区域,热流梯度越小。

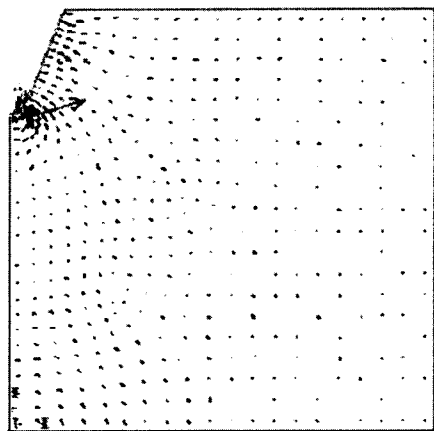


图 9 电弧区域热流梯度分布矢量

3 结论

通过理论假设,使 TIG 焊接电弧的数学模型得

到了简化,成功建立了实用的焊接电弧瞬态温度分布模型。所建立的直流 TIG 焊接电弧两维轴对称模型,可以较好地对焊接电弧区域进行热和电磁分析。

选用间接法的有限元分析方法,在优化流场分析时,不必多次重复进行温度场分析,可以节省大量的计算时间。

采用过渡网格划分的非均匀网格划分方式,在保证计算精度的基础上,有效地缩短了模拟计算的时间,电弧温度场的模拟计算结果与实测值和理论分析相吻合,电磁场模拟结果与理论分析相符。

参考文献:

- [1] 范红刚,陆家榆,史耀武.直流 TIG 焊接电弧的数值分析[J].海军工程学院学报,1996(3):1-6.
- [2] 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.
- [3] Hsu K C, Etemadi K and Pfende E[J].Appl.Phys,2000(54):1293.
- [4] Lowke J J, Tanaka M, Ushio M, Predictions of weld depth in TIG arcs from unified arc-electrode calculations[M].Ljubljana, Slovenia.
- [5] 杜华云.GTAW 电弧的数值模拟[D].兰州:兰州理工大学,2004.
- [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,1995,34(2):??-??.
- [7] Choo R T C, Szekely J. On the calculation of the free surface temperature of gas tungsten arc weld pools from first principles: part1[J].Modeling the Welding Arc Met Trans B,1992,23B(6):357-369.
- [8] 宋勇,艾宴清,梁波.精通 ANSYS 7.0 有限元分析[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [9] 龚曙光.ANSYS 工程应用实例解析[M].北京:机械工业出版社,2003.
- [10] Haddad G N, Farmer A J D, Measurement of arc temperature distribution[J].Weld. J.,1985,64(9):226-232.

焊接熔池结晶过程中产生的缺陷

焊接熔池结晶过程中产生的缺陷有:

- (1) 结晶裂纹(凝固裂纹)。焊接熔池结晶过程中,金属收缩产生的拉应力,将晶界上的低熔点共晶液膜拉开导致产生结晶裂纹。结晶裂纹主要发生在含杂质较多的钢、单相奥氏体、镍基合金、铝合金、铜合金等的焊缝金属中。
- (2) 气孔。高温下焊接熔池中溶解了大量的氢、氧、氮,在快速冷却过程中,这些气体来不及逸出,而留在焊缝金属中(内部或表面)形成穴孔。
- (3) 夹渣。焊接熔渣残留在焊缝金属中的现象。
- (4) 偏析。由于焊接熔池结晶速度较快,形成焊缝中化学元素的分布不均匀,产生偏析现象。