

文章编号: 1673-5196(2013)03-0018-04

氧含量对 TIG 焊瞬态熔池行为影响的数值分析

樊 丁^{1,2}, 郝珍妮¹, 黄 勇^{1,2}, 黄健康^{1,2}

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料重点实验室, 甘肃 兰州 730050; 2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 建立定点高斯热源作用下 TIG 熔池的三维瞬态数学模型, 考虑焊接熔池内各项散热、焊件内部及表面传热、相变潜热、材料热物理性能参数随温度变化等问题, 运用 FLUENT 软件及其 UDF 的二次开发功能, 模拟不同氧含量对熔池温度场及速度场的影响。结果表明: 表面张力温度系数发生转变时的临界温度对熔池温度场和速度场有着决定性影响, 该临界温度随氧含量的增加而增加, 并且随着氧含量增加逐渐向熔池中心靠近。随着临界温度线的转移, 表面张力发生改变, 熔池内的 Marangoni 对流也因此改变, 进而使得熔池形貌从低氧含量时浅而宽的形状变成高氧含量时的深且窄的形状。

关键词: TIG 熔池; 氧含量; 表面张力; 数值模拟

中图分类号: TG402 **文献标识码:** A

Numerical analysis of effect of oxygen content on transient welding pool behavior of TIG welding

FAN Ding^{1,2}, HAO Zhen-ni¹, HUANG Yong^{1,2}, HUANG Jian-kang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Nonferrous Metal Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Alloys, The Ministry of Education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: A 3-D transient mathematical model of the stationary TIG weld pool with Gaussian heat source was developed and taking into account various heat dissipation in the weld pool, heat transfer in the weldment, latent heat, and thermo-physical parameter change with temperature, The effect of different oxygen contents on the temperature and velocity fields of weld pool was simulated by using software FLUENT and its secondary development function of UDF. The result showed that the critical temperature would have a decisive influence on the temperature and velocity fields in the pool if the temperature coefficient of the surface tension was changed. This critical temperature would increase with the increase of oxygen content and approach the weld pool center, the surface tension change with the change of the location of the critical temperature, and consequently, the direction of the Marangoni convection change, thus the weld pool would transform from a shallow and wide shape in the case of low oxygen content to a deep and narrow shape in the case of high oxygen content.

Key words: TIG welding pool; oxygen content; surface tension; numerical simulation

焊接过程中, 液态熔池处于快速熔化、快速凝固的非平衡过程, 很难采用实验手段直接观察焊接熔池行为, 数值分析法能够处理焊接过程中各种复杂的边界条件、热源分布和非线性问题, 具有解析法不可及的优势, 因此采用数值模拟技术对其进行定量

研究已成为近年来比较重要的研究课题^[1]。美国麻省理工学院的 Oreper 和 Szekeley^[2]首先对固定电弧 TIG 焊接熔池内表面张力梯度、电磁力、浮力所引起的流体流动及传热过程建立了数学模型。Zacharia^[3]等将表面张力作为温度和硫含量的函数, 定量分析了表面活性元素和温度梯度对焊缝形状和尺寸的影响。雷永平^[4]等人根据焊接过程中合金熔化与凝固相变的多区域性特点, 采用 3 区域统一模型控制方程和辅助方程, 计算分析了 Fe-Cr-Ni-S 系

收稿日期: 2012-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(51074084), 甘肃省自然科学基金(1010RJZA037)

作者简介: 樊 丁(1961-), 男, 甘肃合水人, 教授, 博导。

中表面活性元素 S 质量分数对热表面张力驱动流和熔池形状的影响。赵玉珍^[5]建立了三维移动 TIG 热源作用下熔池的准稳态模型,模拟研究了不同活性元素氧含量下的熔池形貌,张瑞华^[6]在此基础上还进一步研究了电弧收缩和弧压升高对熔池中流体流动方式的影响。

本文运用 FLUENT6.3,针对定点不锈钢 TIG 焊过程,建立了高斯热源作用下 TIG 熔池的三维瞬态数学模型。通过使用 FLUENT 二次开发功能,编制 UDF 程序,将电磁力和浮力通过源项,表面张力和电弧热通过边界条件加入到软件相应的接口处,进行温度场、速度场的数值求解,模拟分析了不同氧元素含量对 TIG 熔池行为的影响。

1 模型的建立

1.1 基本假设

假设熔池内液态金属为层流、不可压缩的 Newton 流体;来源于电弧的热流密度分布和电流密度分布呈轴对称的 Gaussian 分布;熔池的表面为平面;不考虑熔池表面上方电弧力作用的影响;除表面张力温度梯度系数、热导率、粘度和换热系数外,其余热物理常数与温度无关。

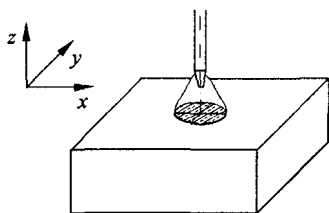


图1 焊接工艺简图

Fig.1 Schematic diagram of welding process

1.2 控制方程

通用控制方程如式(1)所示^[7]:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S \quad (1)$$

式中: Φ 为通用变量,可代表速度、温度等求解变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。

1.3 边界条件

综合考虑计算精度和计算时间,取熔池的1/4进行模拟。在 FLUENT 前处理软件 GAMBIT 中对工件进行网格划分,电弧加热附近划分采用较密网格,其他区域为疏网格。将网格导入 FLUENT 中,设置边界条件。

假设热损失为对流损失、辐射散热和蒸发损失,则作用于工件上表面的热边界条件为^[8]:

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = q_{\text{arc}} - q_{\text{conv}} - q_{\text{radi}} - q_{\text{evap}} \quad (2)$$

式中: q_{arc} 为热源,服从 Gaussian 分布,表示如下:

$$q_{\text{arc}} = \frac{3\eta UI}{\pi r_{\text{H}}^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_{\text{H}}^2}\right) \quad (3)$$

侧表面和下表面的热边界条件取工件与环境间的对流与辐射传热条件,中心对称面为绝热面。

熔池的上表面存在表面张力,表面张力梯度和表面流体的粘性剪切力相平衡,表示如式(4)所示:

$$\begin{cases} -\mu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \\ -\mu \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y} \end{cases} \quad (4)$$

根据 Sahoo^[9]等人的研究结果,表面张力温度系数是温度 T 与活性组元活度 a_i 的函数,其表达式如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \gamma}{\partial T} &= -A - RT_s \ln(1 + K_{\text{seg}} a_i) - \\ &\quad \frac{K_{\text{seg}} a_i}{1 + K_{\text{seg}} a_i} \frac{\Gamma_s \Delta H^0}{T} \end{aligned} \quad (5)$$

$$K_{\text{seg}} = k_1 \exp\left(\frac{-\Delta H^0}{RT}\right)$$

式中: A 是表面张力常数; R 是气体常数; Γ_s 为活性元素的表面饱和过剩; a_i 是活性元素的活度,Fe-O系中, a_i 等于氧含量即氧的质量分数; K_{seg} 是活性元素平衡吸附系数; ΔH^0 是标准吸附热。

初始条件下,在 $t=0$ 时刻,

$$T = T_a \quad u = v = w = 0 \quad (6)$$

1.4 源项的处理

能量守恒方程的源项包括非稳态项和对流项引起的相变潜热变化,动量守恒方程的源项包括 Darcy 项、熔池中的电磁力和浮力。

采用 Enthalpy-Porosity Technique 处理熔化凝固过程,浮力驱动流采用 Boussinesq 模型,通过 UDF 编程将电磁力加入动量源项中。

电磁力表达式为^[8]:

$$F = J \times B \quad (7)$$

式中: J 为电流密度矢量, B 为磁通量矢量。

2 模拟中涉及到的参数

计算材料为 SUS304 不锈钢,材料的对流换热系数 a_c ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$)、热导率 λ ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) 和粘度 μ ($10^{-3} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$) 如式(8~10)所示^[8],模拟中涉及到的其他相关参数如表1所示^[8]:

$$a_c = \begin{cases} (1.0 + 0.0119T) \times 10 & T < 1073 \\ [10.5 + 0.0363 \times (T - 1073)] \times 10 & T \geq 1073 \end{cases} \quad (8)$$

$\lambda =$

$$\begin{cases} 10.717 + 0.0149\,55T & T \leq 780\text{ K} \\ 12.076 + 0.013\,213T & 780\text{ K} \leq T \leq 1\,672\text{ K} \\ 217.12 - 0.109\,4T & 1\,672\text{ K} \leq T \leq 1\,727\text{ K} \\ 8.278 + 0.011\,5T & T \geq 1\,727\text{ K} \end{cases} \quad (9)$$

$\mu =$

$$\begin{cases} 37.203 - 0.017\,6T & 1\,713\text{ K} \leq T \leq 1\,743\text{ K} \\ 20.354 - 0.008T & 1\,743\text{ K} \leq T \leq 1\,763\text{ K} \\ 34.849 - 0.016\,2T & 1\,763\text{ K} \leq T \leq 1\,853\text{ K} \\ 13.129 - 0.004\,5T & 1\,853\text{ K} \leq T \leq 1\,873\text{ K} \end{cases} \quad (10)$$

表 1 材料热物理参数和焊接参数

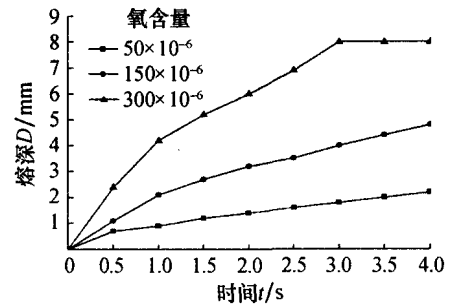
Tab. 1 Thermo-physical parameters of material and welding parameters

参数	数值
密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 200
液相线 T_l/K	1 723
固相线 T_s/K	1 670
环境温度 T_a/K	300
比热 $C_p/(\text{kg} \cdot \text{K})$	753
Stefan-Boltzmann 常数	5.67×10^{-8}
$\sigma_b/(\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)^{-1})$	
热膨胀系数 β/K^{-1}	10^{-4}
蒸发相变潜热 $Q_q/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	7.343×10^6
熔化潜热 $Q_L/(\text{J} \cdot \text{K}^{-1})$	2.47×10^5
表面辐射系数 ϵ/K^{-1}	0.4
真空磁导率 $\mu_0/(\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	1.26×10^{-6}
热流分布半径 r/mm	4.5
焊接电流 I/A	180
电弧电压 U/V	16
电弧热效率 η	0.65

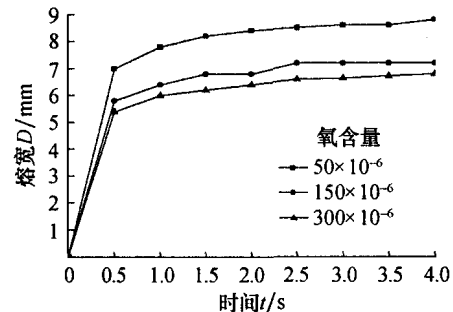
3 不同氧含量对熔池行为的影响分析

图 2 是不同氧含量下 TIG 熔池的熔深和熔宽随时间的变化曲线. 由图 2 可知,同一氧含量下的熔池熔深及熔宽均随电弧加热时间的增加而增大,熔池体积相应增大;对比同一时间不同氧含量下的熔池可知,氧含量的增加使得熔池熔深增加、熔宽减小.

图 3~5 分别是焊接时间为 2 s,氧质量分数为 0.005%,0.015%,0.03%下模拟获得的熔池温度场和速度场. 从图 3~5 可以看出,不同氧含量下,熔池的温度场及流动方式都发生了显著的变化. 表面张力温度系数发生转变时的临界温度对熔池温度场和速度场有着决定性影响,由式(5)可知,该临界温度随氧含量的增加而增加,氧质量分数为 0.005%时在 1 975 K 左右,0.015%时在 2 200 K 左右,0.03%时在 2 370 K 左右,从熔池温度场分布来看,逐渐靠近熔池中心(如图 3b、4b、5b 所示),随着临界温

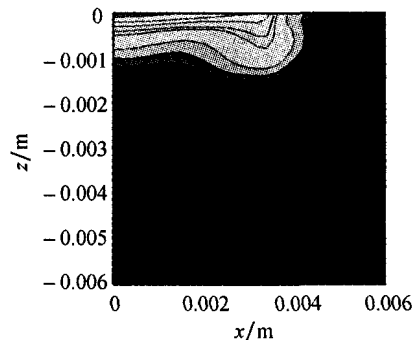
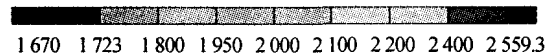


(a) 熔深变化曲线

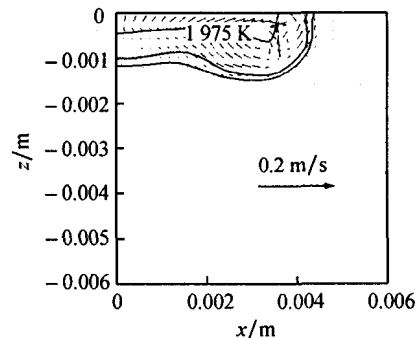


(b) 熔宽变化曲线

图 2 不同氧含量下熔池熔深熔宽随时间的变化曲线
Fig. 2 Variation curves of welding pool depth and width with time for different oxygen content



(a) 温度场



(b) 速度场

图 3 氧含量 50×10^{-6} 时熔池的温度场及速度场
Fig. 3 Velocity field and temperature field in welding pool with 50×10^{-6} oxygen content

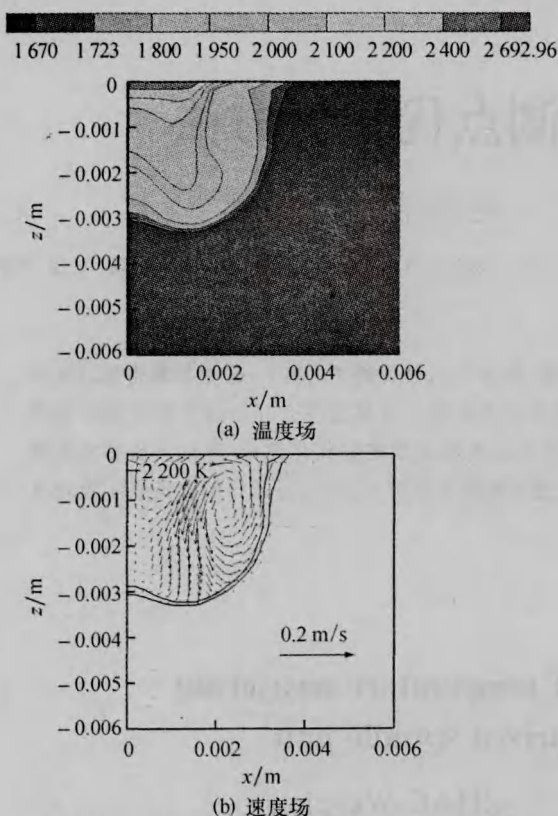


图4 氧含量0.015%时熔池的温度场及速度场

Fig. 4 Velocity field and temperature field in welding pool with 0.015% oxygen content

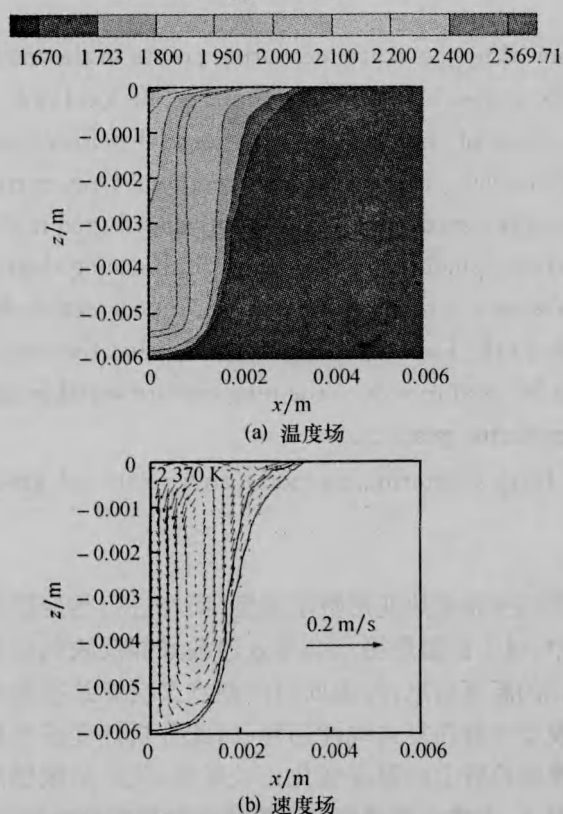


图5 氧含量0.03%时熔池的温度场及速度场

Fig. 5 Velocity field and temperature field in welding pool with 0.03% oxygen content

度线的转移,表面张力发生改变,熔池内的 Marangoni 对流也因此改变,在 0.005% 时,熔池中大部分区域内的 Marangoni 流从熔池中心指向熔池周边,仅在熔池边缘很小一部分内从熔池周边指向熔池中心,形成了浅且宽的熔池形貌;在 0.015% 时,熔池中存在方向截然相反、强弱差异不大的 2 股 Marangoni 对流,形成了勺形的熔池形貌;在 0.03% 时,熔池的 Marangoni 流基本上全部从熔池周边指向熔池中心,形成了深且窄的熔池形貌。

4 结论

建立了三维 TIG 焊瞬态模型,利用 FLUENT 软件的相应模型,求解出了不同氧含量下 TIG 熔池形貌随时间的动态变化。

熔池中氧含量的增加使得熔池的温度场及速度场产生了巨大变化,主要原因是表面张力温度系数发生转变时的临界温度随氧含量的增加而增大,进而影响了熔池的 Marangoni 对流,造成了截然不同的熔池形貌。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] OREPER G M, SZEKELY J. Heat and fluid-flow phenomena in weld pools [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984, 147(10): 53-79.
- [3] ZACHARIA T, DAVID S A, VITEK J M, et al. Modeling of interfacial phenomena in welding [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1990, 21(3): 600-603.
- [4] 雷永平,史耀武,村川英一. 表面活性元素对 Marangoni 流和熔池形状影响的数值分析 [J]. 机械工程学报, 1999, 3(6): 29-33.
- [5] 赵玉珍,雷永平,史耀武. A-TIG 焊中氧含量对熔池流动方式影响的数值模拟 [J]. 金属学报, 2004, 40(10): 1085-1092.
- [6] 张瑞华. 活性焊接法及熔深增加机理的数值模拟研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2005.
- [7] 张师帅. 计算流体力学及其应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.
- [8] 武传松. 焊接热过程与熔池形态 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [9] SAHOO P, DEBROY T. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy [J]. Metallurgical Transactions B, 1988, 19(2): 483-491.