

脉冲 TIG 焊接熔池流场与热场 动态过程的数值模拟

郑 炜 武传松* 吴 林
(哈尔滨工业大学)

摘要 对运动电弧作用下脉冲 TIG 焊接熔池流场与热场动态变化过程建立了三维数学模型。同时, 设计了一套适合该模型非稳态、非线性、多相区和强耦合特点的数值模拟算法。脉冲 TIG 焊接工艺试验结果表明计算值与测试值基本吻合。

关键词: 脉冲焊接 熔池 流场 热场 数值模拟

0 序 言

近年来, 人们逐渐认识到焊接熔池内液态金属的流动强烈地影响着焊缝的几何尺寸及接头的组织和性能。由于实际焊接条件的限制, 通过试验手段观测熔池内的流体流动状态是相当困难的。因此, 用数值模拟技术对熔池流体流动和传热过程进行定量研究已成为焊接学科的前沿领域, 并取得了很大进展^[1~3]。但这些研究工作都是针对恒定电流连续焊接过程的。对于脉冲 TIG 焊接熔池流场和热场的数值分析, 尚未见报道。脉冲 TIG 焊接是生产中广泛应用的工艺方法, 其主要特点是易于控制对母材的热输入和焊缝成形, 并改善结晶组织, 从而得到高质量的焊缝^[4]。由于焊接电流的周期性变化, 焊接工艺参数增加, 脉冲焊接熔池行为及热循环更加复杂, 焊接规范参数之间的合理匹配问题更加突出。利用数值模拟技术对这种工艺过程进行深入的基础性研究, 对于了解焊缝成形的实质、优化脉冲焊接工艺参数、控制热影响区组织与性能, 具有重要的理论意义和实用价值。本文介绍脉冲 TIG 焊接熔池流场与热场动态变化过程的数值分析模型。

1 模型的建立

脉冲 TIG 焊接时, 熔池的体积及其流场和热场随脉冲电流作周期性变化。峰值电流 I_p 作用期间, 工件温度升高, 熔池长大; 基值电流 I_b 作用期间, 工件温度降低, 熔池凝固, 如此循环往复。动坐标系下的控制方程为

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (K \nabla T) \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = \vec{F}_b - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (2)$$

$$\Delta \cdot \vec{v} = 0 \quad (3)$$

式中 ρ 为试件材料的密度, c_p 为定压比热容, T 为温度, t 为时间, \vec{v} 为流速矢量, K 为导热系数, \vec{F}_b 为体积力, P 为压力, μ 为流体的动力粘度。由于电流的脉冲作用, 凡是与焊接电流有关的量,

* 武传松现在山东工业大学工作。

如电弧输入到工件表面的热流、熔池中的体积力等, 均随电流的周期性变化而变化。

为提高精度, 表面张力温度系数 $\partial r / \partial T$ 按 sahoo 半经验公式计算³:

$$\frac{\partial r}{\partial T} = -A - R \Gamma_s \ln(1 + K_{\text{seg}} a_s) - \frac{K_{\text{seg}} a_s \Delta H^0 \Gamma_s}{T(1 + K_{\text{seg}} a_s)} \quad (4)$$

式中, A 是常数, Γ_s 是表面过饱和参数, a_s 是合金中硫的活度, ΔH^0 是偏析焓, K_{seg} 是偏析平衡常数。

熔池表面蒸发散热的热流 q_{evp} 为:

$$q_{\text{evp}} = W_v h_{fg} \quad (5)$$

式中 h_{fg} 是蒸发潜热, W_v 是蒸发率。 W_v 由下式确定:

$$\log W_v = A_v + \log P_{\text{atm}} - 0.5 \log T \quad (6)$$

式中 A_v 是常数, P_{atm} 是蒸汽压。

采用显热容法处理相变潜热。固液两相区内的定压比热容 $C^*(T)$ 和导热系数 $K^*(T)$ 的表达式为

$$C^*(T) = \frac{\rho \lambda}{T_1 - T_s} + \frac{\rho(C_1 + C_s)}{2} \quad (7)$$

$$K^*(T) = K_s + \frac{K_1 - K_s}{T_1 - T_s} (T - T_s) \quad (8)$$

式中 λ 为熔化/凝固相变潜热, C 和 K 分别表示定压比热容和导热系数, 下标 1 和 s 分别表示液相和固相。

具体计算过程和参数选取方法见文献[6]。

2 求解技术

在本文模型中, 动量方程和能量方程通过源项及边界条件而互相强烈耦合。本文把处理导热问题边界条件的附加源项法推广应用于处理动量方程边界条件, 并用附加源项法处理全部边界条件, 使得到的离散方程既能正确反映边界条件的影响, 而又不包含未知的边界值, 加快了迭代收敛速度。在处理流场中速度与压力的耦合问题时, 采用了 SIMPLEC 算法, 其收敛特性优于通常采用的 SIMPLE 和 SIMPLER 算法⁷。离散方程迭代求解时, 采用了 ADI(交替方向隐式)线迭代法与块修正技术相结合的方法。对于每一个时间步长上结束迭代求解的判据, 采用变化率判据(判断热场收敛)和余量判据(判断流场收敛)。在熔化区内采用较细的均匀网格, 熔化区外采用扩张的非均匀网格。采用 FORT RAN77 编程, 在 HP9000 计算机工作站上运算。

3 计算结果

利用上述模型和算法, 对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢试件脉冲 TIG 焊接时的熔池流场与热场进行了数值计算。

图 1 所示为工件上表面某些点在焊接过程中所经历的热循环。图中三条曲线分别表示距焊缝中心线 0.45mm、3.35mm 和 5.25mm 的点。图中实线对应脉冲 TIG 焊接(焊接规范参数为: 峰值电流 $I_p = 170\text{A}$, 基值电流 $I_b = 35\text{A}$, 峰值电流作用时间 $t_p = 1.0\text{s}$, 基值电流作用时间 $t_b = 1.0\text{s}$, 电弧

电压 $U=13V$, 焊接速度 $v_0=1.6\text{mm/s}$; 工件尺寸为 $100\text{mm} \times 50\text{mm} \times 4\text{mm}$), 虚线对应恒流 TIG 焊接(焊接电流 $I=102.5\text{A}$, $U=13\text{V}$, $v_0=1.6\text{mm/s}$)。在脉冲焊接时, 由于电流的脉冲作用, 接头各点都经历了两、三次加热和冷却的作用, 高温停留时间比恒流焊接时缩短, 这就是脉冲焊接接头晶粒得到细化的原因之一。另外从图中可以看到, 在电弧运动过程中, 只有离被考察点最近的两、三个脉冲对该点的脉冲作用较明显, 而远处脉冲的影响迅速减弱, 并且随着焊缝中心线距离的增大, 脉冲对其影响也迅速减弱。

图 2 是熔深及熔宽随焊接时间的变化过程。两者均随焊接电流作周期性变化。引弧四、五个脉冲周期后热场达到宏观准稳态, 熔深及熔宽在每脉冲周期内增加或减小的幅度基本不变。

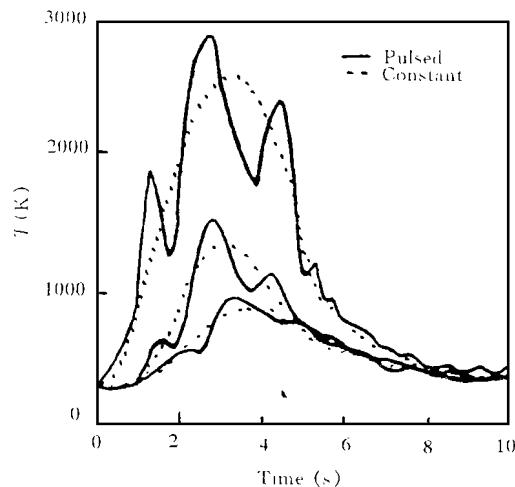


图 1 工件表面上的点所经历的热循环

Fig. 1 Thermal cycle of points on workpiece surface

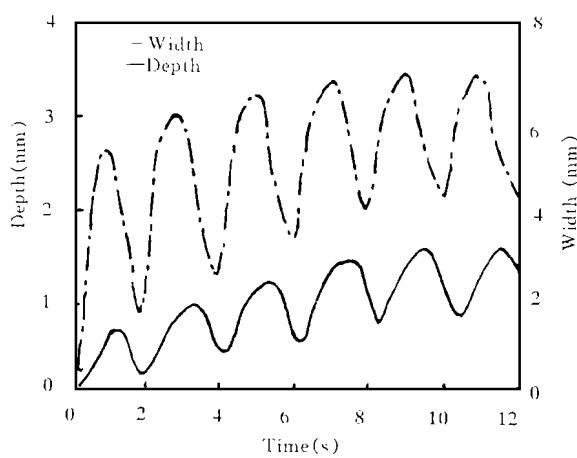


图 2 熔深和熔宽随焊接时间的变化

Fig. 2 Weld depth and width vs. welding time

图 3 为熔池流场示意图(横截面)。图 3a 对应脉冲峰值作用结束时刻, 图 3b 对应脉冲基值作用结束时刻(焊接规范为: $I_p=170\text{A}$, $I_b=25\text{A}$, $t_p=0.5\text{s}$, $t_b=0.5\text{s}$, $U=13\text{V}$, $v_0=2.4\text{mm/s}$; 工件尺寸为 $120\text{mm} \times 60\text{mm} \times 3\text{mm}$)。图中的两条曲线分别表示固相线和液相线, 箭头表示了熔池中流体流动的方向。早在 80 年代初人们就已认识到当焊接电流低于 150A 时熔池内流体流动主要受表面张力梯度 (Marangoni 力) 驱动^[8]。对 $1\text{Cr}18\text{Ni}9\text{Ti}$ 不锈钢, 由式 (4) 可知表面张力温度系数 $\partial r / \partial T$ 是温度的函数。当温度较高时, $\partial r / \partial T > 0$, 这时 Marangoni 力驱使流体向温度升高的方向流动。

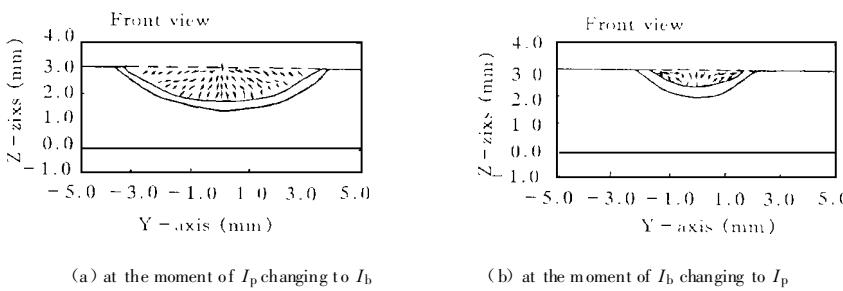


图 3 熔池流场示意图

Fig. 3 Fluid flow field in weld pool (transverse section)

当温度较低时, $\partial r / \partial T < 0$, Marangoni 力驱使流体向温度降低的方向流动。在基值电流作用结束时刻, 熔池中温度较低, 熔池表面的流体在 Marangoni 力的驱动下由熔池边缘向中心流动, 在熔池中心线附近向下流动。在峰值电流作用结束时刻, 除熔池边缘的一少部分面积外, 熔池表面温度较高, 熔池表面的流体在 Marangoni 力驱动下, 由熔池中心向外径向流动; 而熔池边缘处温度较低, 流体径向向内流动, 这时的流场是两种方向的流动综合作用的结果。

4 试验验证

为了验证本文模型, 建立了一套以计算机视觉正面检测为基础的试验检测系统, 并对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢试件进行了平板堆焊工艺试验。试验系统由 IBM-PC386 控制, 并通过 8031 单片机系统对焊接电流、速度、脉冲频率等规范参数进行控制, 使得整个系统的精度高、再现性好。试验用电极为钍钨极, 电极直径 3.0mm, 氩气流量为 10L/min, 焊接规范采用计算模型中的规范参数。

脉冲 TIG 焊接过程中, 熔池尺寸是随焊接时间变化的, 为了反映这个动态变化过程, 本文以工业摄像机为传感器, 摄取熔池区图象, 然后对所获得的图象进行处理并检测熔池宽度。根据脉冲 TIG 焊接的特点, 在脉冲基值期间, 利用弧光对熔池区的照射, 获取熔池区图象, 对所获取的图象采用 FIR 线形数字滤波、中间滤波以及 Laplace 图象边缘增强等方法进行图象处理, 并利用差分原理提取焊缝及熔池宽度信息。图 4 所示为试验测量值与图 2 中达到宏观准稳态后的熔宽计算值的比较, 可见试验值与计算值吻合良好。

采用 NiCr-NiSi 型热电偶测量工件上表面热影响区某点的温度, 图 5 是工件上表面距焊缝中心线 5.25mm 处某点热循环曲线的实测值与计算值。

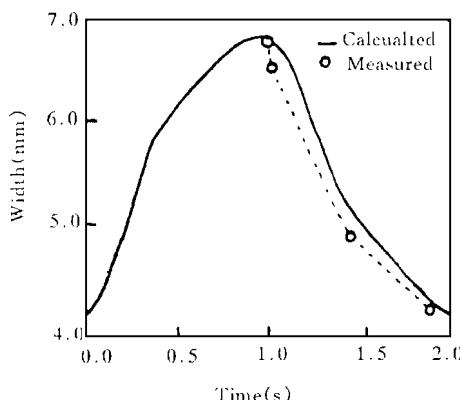


图 4 熔池宽度计算值与测试值的比较

Fig. 4 Comparison between predicted and experimental weld pool width

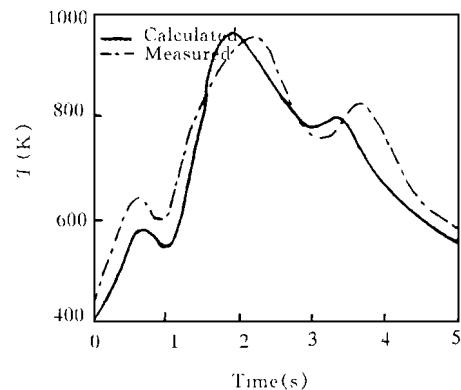


图 5 热循环计算值与测试值的比较

Fig. 5 Comparison between predicted and measured thermal cycle

5 结 论

(1) 建立了运动电弧作用下脉冲 TIG 焊接熔池流场与热场动态过程的数值分析模型。该模型综合考虑了在电弧热流的周期性作用下熔池流场—温度场—熔池形状所发生的周期性变化、熔池表面的蒸发散热、熔池固液界面的相变潜热以及表面张力温度系数随温度的变化情况。

(2) 建立了一套适合本模型的数值模拟算法。采用附加源项法处理全部能量边界条件及动量边界条件; 采用显热容法处理相变潜热; 采用了收敛特性较优的 SIM PLC 算法; 迭代求解差分方程时采用了 ADI 线迭代与块修正技术相结合的方法。这套算法较大地提高了迭代收敛速度。

(3) 计算结果展示了脉冲 TIG 焊接过程中, 熔池流场、温度场及熔池形状随着焊接电流的变化而发生周期性变化的规律。

(4) 计算机视觉焊缝正面检测试验结果表明: 本文提出的数值模拟方法能够在一定程度上反映实际焊接过程的特点。

(1997—03—06 收到初稿, 1997—08—08 收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 Oreper G M and Szekely J. A comprehensive representation of transient weldpool development in spot welding operations. *Metall Trans. A*, 1987, 18A(6): 1325~1333
- 2 Zacharia T. Effect of evaporation and temperature—dependent material properties on weld pool development. *Metall Trans.*, 1991, 22B(4): 233~241
- 3 David S A. Weld pool phenomena. *IIW Doc. 212—829—1993*, 1~29
- 4 殷树言. 气体保护焊工艺. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1989, 181~190
- 5 Sahoo P. Surface tension on binary metal surface active solute systems under condition relevant to welding metallurgy. *Metall Trans. B*, 1988, 19B: 483~491
- 6 郑炜. 哈尔滨工业大学工学博士论文. 1996.
- 7 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988, 88~98
- 8 Heiple C R. and Roper J R. Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry. *Weld J.* 1982, 61(4): 97s~102s

Numerical simulation for Transient Behavior of Fluid Flow and Heat Transfer in Pulsed Current TIG Weld Pool

Zheng Wei, Wu Chuansong, Wu lin
(Harbin Institute of Technology)

Abstract A three-dimensional numerical analysis model of fluid flow and heat transfer in pulsed current TIG weld pool is developed. According to the characteristics of transient, nonlinear, multiphase and strong coupling features between the governing equations, a numerical simulation algorithm method is developed, which can evidently speed up the iterative convergence rate. The results of numerical simulation demonstrate the transient behavior of fluid flow field, temperature field and weld pool shape in pulsed current TIG welding process on the workpiece of 1Cr18Ni9Ti stainless steel. The bead-on-plate pulsed current TIG welding experiments show that the predicted results by the model introduced in this paper are in good agreement with the experimental ones.

Key words pulsed current TIG welding, fluid flow, heat transfer, numerical simulation