

# 脉冲电流作用下 TIG 焊接熔池行为 的数值模拟 \*

武传松

(山东工业大学连接技术研究所, 济南 250061)

郑 炜 吴 林

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 建立了脉冲 TIG(Tungsten Inert Gas) 焊接熔池行为的数值分析模型, 分析了脉冲电流对 TIG 焊接熔池流场、热场及熔池形状的影响规律. 计算结果表明: 熔池体积对电流的脉冲作用较敏感; 脉冲 TIG 焊接熔池内流体流动的主要驱动力是表面张力梯度; 熔池中的流场随电流作周期性变化. 利用自行研制的计算机视觉实验系统, 测试了一个脉冲周期内熔池宽度的动态变化过程, 计算值与测试值基本吻合.

**关键词** 脉冲焊接, 熔池, 流场, 热场

**中图法分类号** TG44, O242

## NUMERICAL SIMULATION OF TIG WELD POOL BEHAVIOR UNDER THE ACTION OF PULSED CURRENT

*WU Chuansong*

Institute of Joining Technology, Shandong University of Technology, Jinan 250061

*ZHENG Wei, WU Lin*

College of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology Harbin 150001

*Correspondent: WU Chuansong, professor, Fax: 531-2955999, Tel: 0531-2955081*

Manuscript received 1997-04-17

**ABSTRACT** A mathematical model is established for simulating the TIG(Tungsten Inert Gas) weld pool behavior in pulsed TIG welding. It was analyzed how the pulsed current affects the fluid flow and heat transfer in a TIG weld pool and the pool geometry. The computed results show that the volume of weld pool is sensitive to the action of pulsed current, the gradient of the surface tension is the main driving force for the fluid flow in pulsed TIG weld pool, and the fluid velocity field changes periodically with the pulsed current. The computer vision-based experiment system is used to measure the varying process of the weld pool width in a pulsed cycle. The predicted weld pool width is in agreement with the measured one.

**KEY WORDS** pulsed welding, weld pool, fluid flow, temperature profile

\* 山东省自然科学基金重点资助项目

收稿日期: 1997-04-17

国内外科研人员对恒流 TIG 焊接熔池流场和热场的数值分析进行了大量研究<sup>[1-6]</sup>, 但对于脉冲 TIG 焊接熔池流体流动和传热过程的研究, 尚未见报道<sup>[7]</sup>. 脉冲 TIG 焊接是在制造一些对接头质量要求很高的产品(如卫星、火箭、核电站的管线等)时常常选用的工艺方法, 其主要特点是易于控制对母材的热输入和焊缝成型, 并改善结晶组织<sup>[8]</sup>. 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, 对于了解焊缝成型的实质、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模拟结果.

## 1 模型的主要特点

### 1.1 非稳态

恒定电流作用下, 熔池及其周围热场处于准稳态. 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. 脉冲电流波形如图 1 所示. 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

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

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

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

式中,  $\rho$  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,  $\mu$  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, 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. 焊接电流  $I$  可表示为

$$I = I_p, nt_c \leq t < nt_c + t_p$$

$$I = I_b, nt_c + t_p \leq t < (n+1)t_c \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

式中符号意义见图 1.

### 1.2 移动的固液两相区

在脉冲 TIG 焊接过程中, 脉冲峰值期间母材不断被加热熔化, 而在脉冲基值期间则不断冷却凝固. 这是一个伴有熔化 / 凝固相变的传热问题, 两相界面不仅随时间变化, 而且在两相界面上伴随有热量的吸收或释放. 所建立的模型采用显热容法, 将相变潜热看作是在相变温度范围内有一个很大的热容, 这样就能在整个求解区域上(包括液相、固相和两相区)建立统一的非线性能量方程. 当计算出工件上的温度分布时, 就可以确定固液两相界面的位置. 采用这

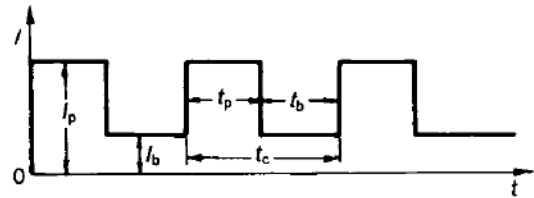


图 1 脉冲电流波形

Fig.1 An ideal pulsed current waveform ( $I_p$ =pulse current,  $I_b$ =base current,  $t_p$ =pulse time,  $t_b$ =duration time,  $t_c$ =pulse cycle)

种方法处理相变潜热时, 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

$$C^*(T) = \frac{\rho\lambda}{T_1 - T_s} + \frac{\rho(C_l + C_s)}{2} \quad (5)$$

$$K^*(T) = K_s + \frac{K_l - K_s}{T_1 - T_s}(T - T_s) \quad (6)$$

其中,  $\lambda$  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  $l$  和  $s$  分别表示液相和固相.

### 1.3 附加源项

在将偏微分方程组 (1) — (3) 转化为离散方程时, 需要对其边界加以处理. 本文提出了动量边界条件的附加源项法, 并用这一方法处理了全部的能量和动量边界条件, 使得到的离散方程既能正确地反映边界条件的影响, 又不包含未知的边界值, 从而把离散方程组的迭代求解限于内部节点, 加快了收敛速度, 节省了计算时间.

### 1.4 求解方法

求解脉冲 TIG 焊接时的非稳态问题相当于在每一个时间步长上求解一个准稳态问题, 计算量相当大. 如何提高计算速度就显得非常重要. 本文模型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. 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). 计算实践表明, 本文采用算法的迭代收敛速度约提高三倍.

## 2 数值模拟结果与讨论

基于上述模型, 本文对 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. 所采用的规范参数中, 电弧电压  $U=13$  V, 脉冲峰值作用时间  $t_p$  与基值作用时间  $t_b$  相等,  $t_p=t_b=1.0$  s, 对应的脉冲频率为 0.5 Hz, 电流波形为方波直流脉冲. 工件材料热特性及其它参数取值见文献 [9].

图 2 为熔池体积随焊接时间的变化过程. 在脉冲峰值期间, 熔池体积增大, 而在脉冲基值期间, 熔池体积减小. 随着焊接过程的进行, 在每一个脉冲周期内, 熔宽在  $t_p$  期间达到的最大值与  $t_b$  期间降到的最小值之差逐渐减小, 直至引弧后经历四、五个脉冲周期, 熔池体积的最大值与最小值基本稳定下来, 只随脉冲电流作周期性的动态变化. 图 2 所对应的其它焊接规范参数为: 峰值电流  $I_p=170$  A, 基值电流  $I_b=35$  A, 焊接速度  $v_0=1.6$  mm/s; 工件尺寸为  $100$  mm $\times$  $50$  mm $\times$  $4$  mm.

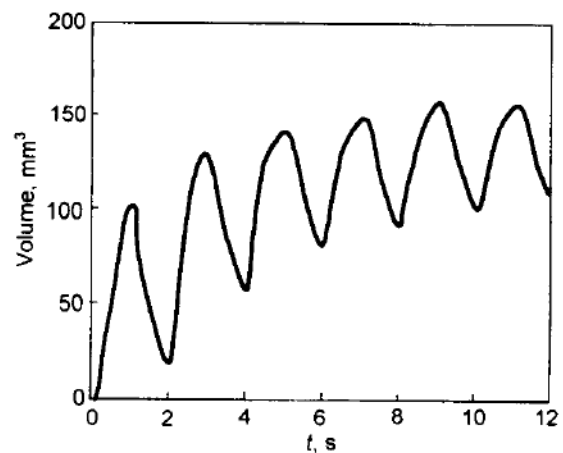


图 2 熔池体积的变化过程

Fig.2 The varying process of weld pool volume

图 3a—c 和 d—f 分别是峰值电流和基值电流作用结束时刻工件中的温度分布. 所对应的焊接规范参数:  $I_p=175$  A,  $I_b=25$  A,  $v_0=2.4$  mm/s; 工件尺寸为 120 mm×60 mm×3 mm. 低温等温线 (1000 K) 表示热影响区中的温度分布, 它主要受金属固态导热的影响. 峰值电流作用期间, 熔池传向热影响区的热量较多, 低温等温线扩张. 基值电流作用期间, 熔池传递到热影响区的热量少于散失的热量, 低温等温线收缩. 高温等温线 (2000 K) 反映了熔池中的温度分布, 它不仅受电弧热流的影响, 而且也受熔池内流体流动状态的影响.

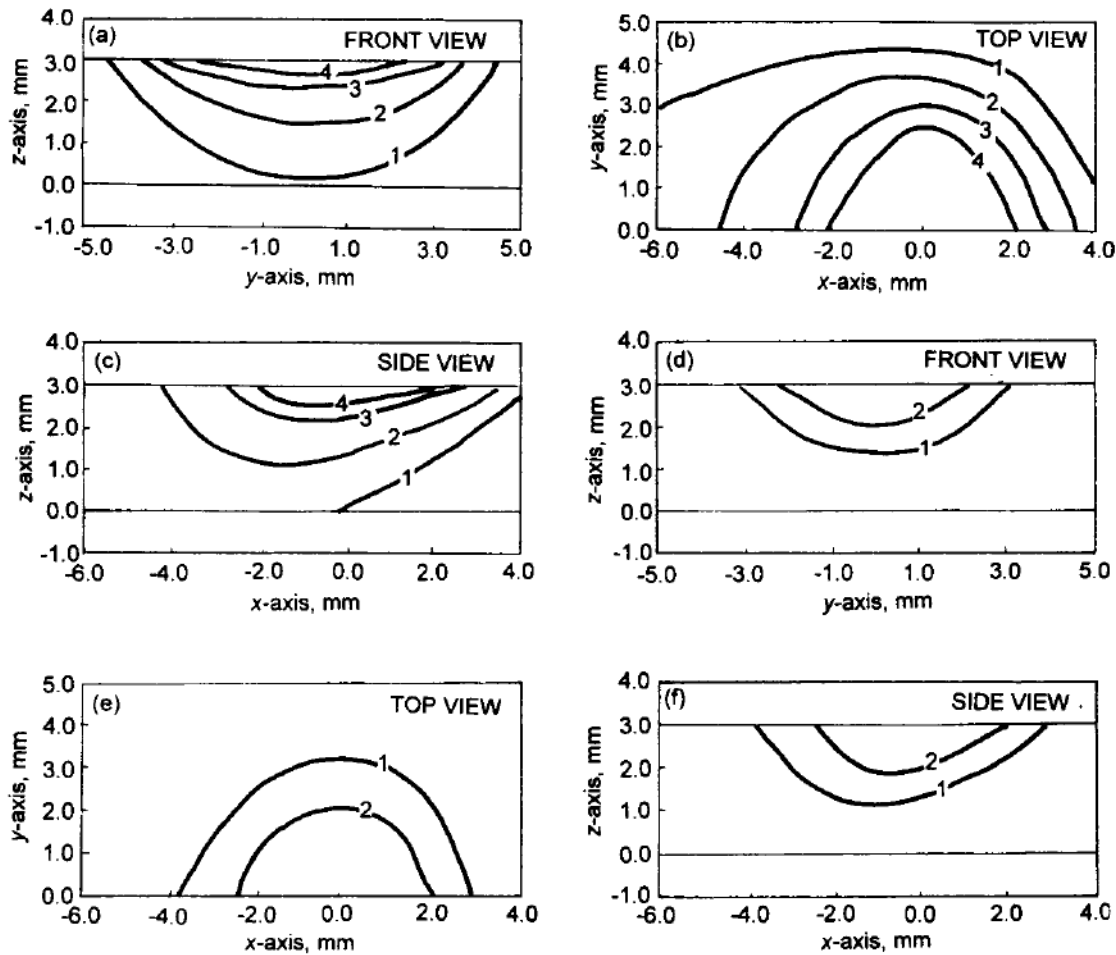


图 3 工件中的温度分布

Fig.3 Temperature profiles in the workpiece

1 — 1000 K, 2 — 1500 K, 3 — 2000 K, 4 — 2500 K

(a),(b),(c) at the moment of  $I_p$  changing to  $I_b$

(d),(e),(f) at the moment of  $I_b$  changing to  $I_p$

图 4a—f 分别是与图 3a—f 相对应情况下的熔池流场示意图. 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, 本文将固液两相区中的流体流速设定为零. 表面张力温度系数  $\partial\sigma/\partial T$  是温度及材料成分的函数. 对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 当温度较高时,  $\partial\sigma/\partial T > 0$ , 这时表面张力梯度 (Marangoni 力) 驱使流体向温度升高的方向流动. 当温度较低时,  $\partial\sigma/\partial T < 0$ , 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, 除熔池边缘的一小部分面积外, 熔池表面温度较高, 熔池表面的流体在 Marangoni 力驱动下, 由熔池中心向外径方向流动; 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.

图 5a — f 是分别与图 4a — f 相对应情况下熔池三个轴线上的温度分布 (虚线) 及速度分布 (实线). 这里所指的熔池轴线为:  $z$  轴与动坐标系的  $z$  轴重合,  $x$  轴和  $y$  轴分别与动坐标系  $x$  轴和  $y$  轴平行并位于熔池上表面的轴线. 由于熔池中流体流动主要受 Marangoni 力驱动, 因此最大流速发生在熔池表面温度梯度最大处. 一般情况下, 熔池表面温度梯度最大处发生于沿焊缝中心线上的电弧前方且靠近熔池边缘处, 故这里的流速最大, 达到了 m/s 的数量级. 在焊缝中心线上的电弧后方, 温度梯度较大, 出现了速度的第二个峰值. 沿熔宽方向温度梯度稍小, 流速为 10cm/s 的数量级. 而沿熔深方向, 流速很小, 一般为 mm/s 的数量级. 另外, 熔池中的流速与熔池体积也有关, 脉冲峰值时熔池体积较大, 流速最大值也较大. 熔池中的流体流动方向, 受熔池内温度分布的影响, 反过来又影响着熔池内的温度分布.

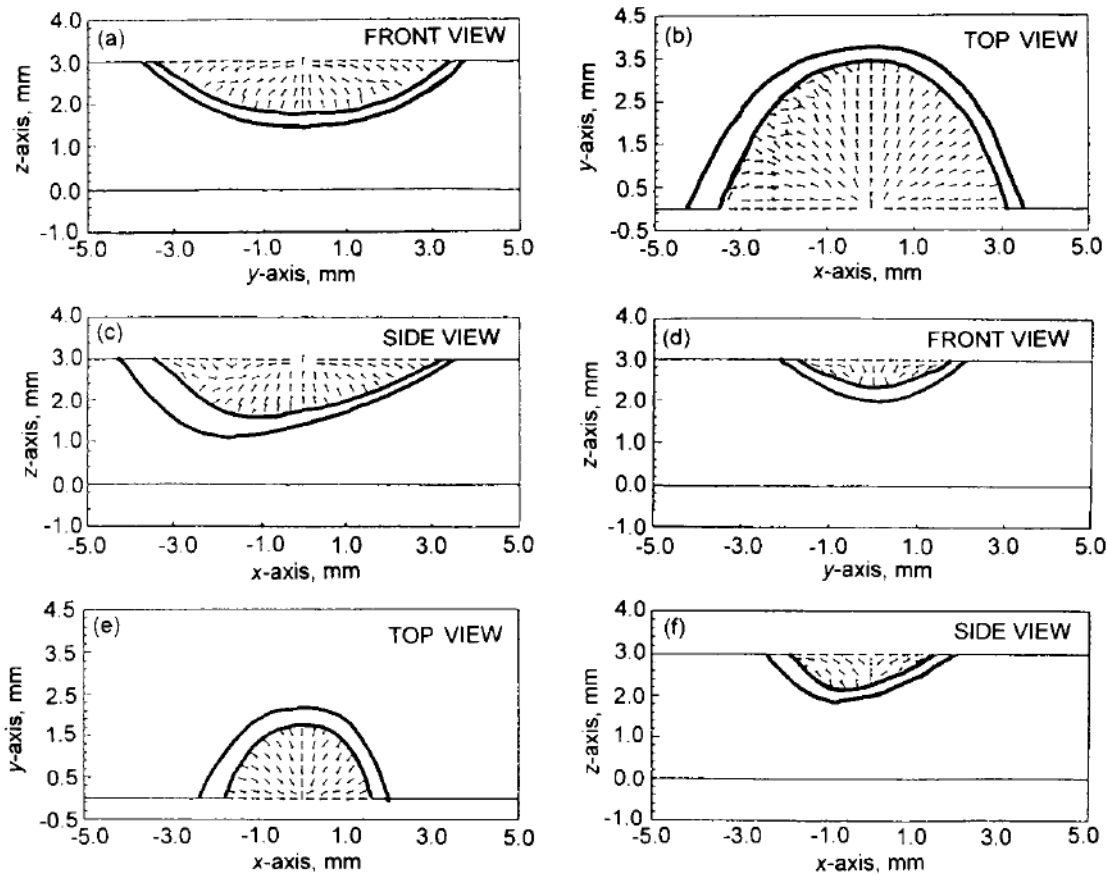


图 4 熔池中的流场

Fig.4 Fluid flow field in weld pool

(a),(b),(c) at the moment of  $I_p$  changing to  $I_b$

(d),(e),(f) at the moment of  $I_b$  changing to  $I_p$

### 3 实验验证

熔池中的流体流动及传热过程都对熔池宽度 (简称熔宽) 产生影响, 熔宽的变化过程反映了熔池流场与热场综合作用的结果. 将熔宽随脉冲电流的动态变化过程作为被检测量. 研制了一套实验检测系统, 它由工业摄像机、监视器、图像卡、脉冲 TIG 焊机以及主控计算机等组成.

在焊接过程中, 工业摄像机直接观察熔池区景象, 经图像卡进行转换后得到熔池区的数字化图像. 由于峰值电流作用期间弧光干扰强烈, 无法获得可辨认的清晰图像. 在基值电流作用期间弧光干扰较小, 如果基值电流选择合适, 可获得较为清晰的熔池图像. 在脉冲基值作用期间实时采集几幅图像, 其中第一幅图像是在焊接电流由峰值转变为基值后的瞬时采集的. 由于热惯性的作用, 热场的变化滞后于电参数的变化, 可以认为此时的熔池对应于峰值电流作用结束时刻, 即每个脉冲周期内的最大熔池. 所采集的最后一幅图像对应于基值电流作用结束时刻, 即每个脉冲周期内的最小熔池.

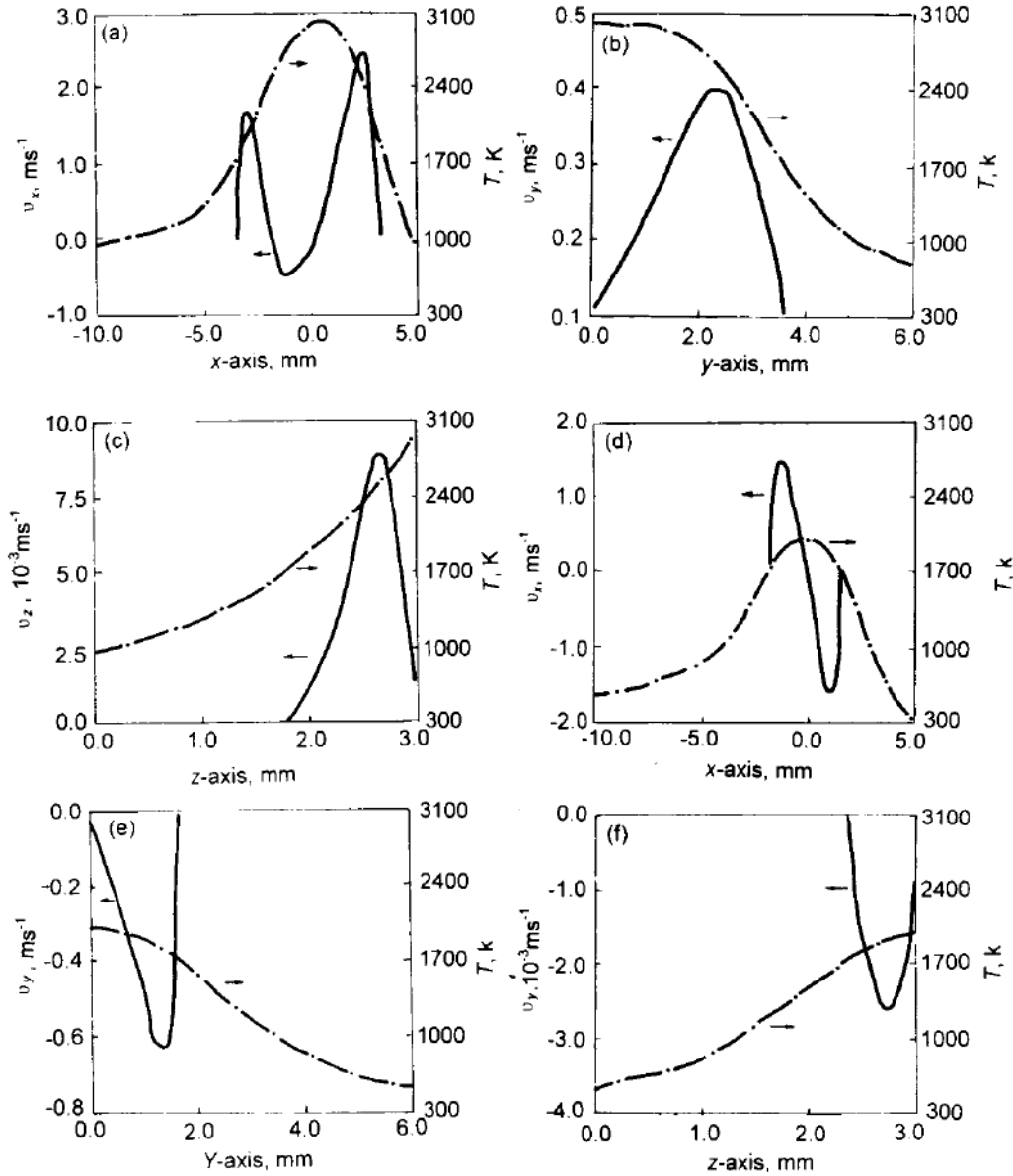


图 5 熔池中的流速与温度分布

Fig.5 The fluid velocity and temperature distribution in weld pool

$v_x, v_y, v_z$ : fluid velocity components in  $x, y, z$  directions

(a),(b),(c) at the moment of  $I_p$  changing to  $I_b$

(d),(e),(f) at the moment of  $I_b$  changing to  $I_p$

对所采集的图像经过一系列处理后可检测出相应的熔宽信息. 图 6 表示一个脉冲周期内熔宽变化过程计算值与实测值的比较情况. 工件材料、尺寸与焊接规范参数与图 2 相同.

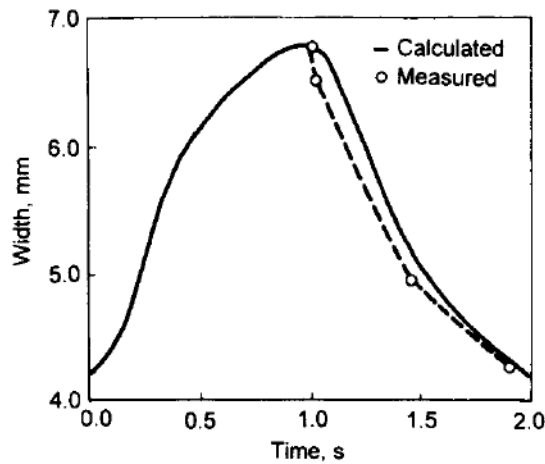


图 6 一个脉冲周期内熔宽变化过程计算值与测试值的比较

Fig.6 Comparison of predicted and measured weld pool width during a pulse cycle

## 4 结 论

(1) 建立了脉冲电流作用下三维 TIG 焊接熔池流场与热场的数值分析模型, 综合考虑了固液界面的移动、相变潜热以及表面张力温度系数随温度变化的因素, 定量描述了电弧热流周期性作用下熔池中的流体流动状态、温度分布以及熔池几何形状所发生的动态变化过程。

(2) 熔池体积对电流的脉冲作用较敏感, 并基本与之同步变化。脉冲 TIG 焊接熔池内流体流动的主要驱动力是表面张力梯度。随着焊接电流周期变化, 熔池中流场亦周期性变化。

(3) 利用计算机视觉实验系统采集和处理了脉冲基值期间的动态熔池图像, 提取出了熔宽信息。一个脉冲周期内熔宽变化过程的计算值与测试值基本吻合。

## 参 考 文 献

- 1 Ramanan N, Korpela S A. *Metall Trans*, 1990; 21A: 45
- 2 Choo R T C, Szekely J. *Weld J*, 1991; 70: 223s
- 3 Zacharia T. *Metall Trans*, 1991; 22B: 233
- 4 武传松, 曹振宁, 吴 林. 金属学报, 1992; 28: B428  
(Wu Chuansong, Cao Zhenning, Wu Lin. *Acta Metall Sin*, 1992; 28: B428)
- 5 Wu C S, Dorn L. *Comput Mater Sci*, 1994; 2: 741
- 6 Domey J, Aidun D K. *Weld J*, 1995; 75: 263s
- 7 郑 炜, 武传松, 吴 林. 材料科学与工艺, 1996; 4: 15  
(Zheng Wei, Wu Chuansong, Wu Lin, *Mater Sci Technol*, 1996; 4: 15)
- 8 殷树言, 张九海. 气体保护焊工艺. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988: 181  
(Yin Shuyan, Zhang Jiuhai. *Gas Shielded Arc Welding Technology*. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1988: 181)
- 9 郑 炜. 哈尔滨工业大学工学博士学位论文, 1996  
(Zheng Wei. Ph.D Thesis, Harbin Institute of Technology, 1996)