

基于二维焊接温度场检测的三维 温度场计算机模拟^{*}

张 华

(南昌大学机电研究所)

潘际銮

(北京 清华大学)

摘要 采用图象比色法, 建立了焊接温度场实时检测系统, 快速获取了二维焊接温度场分布。对于低碳钢薄板 TIG 焊, 利用实际检测二维温度场分布结果, 对各种热源分析模型进行了验证, 得到双椭圆热源分布模型二维温度场计算结果与实际温度检测结果最为接近。利用双椭圆热源分布的数值计算模型和实际检测二维温度场分布结果作为边界条件, 获得了整个焊件更宽温度范围和三维温度场分布的在线模拟。正反熔宽模拟计算结果与实际的结果吻合。

关键词: 图象比色法 焊接温度场 ICCD 计算机模拟

0 序 言

图象比色法是一种新的温度场检测方法, 它是利用图象电荷耦合器件 (ICCD) 获取两幅不同波长辐射的热图象, 然后通过计算机图象系统进行灰度比色等处理, 得到物体的温度场分布。这种方法克服了以往的温度场检测的不足, 如对目标发射率、目标距离、标定等依赖性的问题^[1]。对于焊接温度场, 检测系统只能获得焊接工件表面二维温度场的分布, 而且受检测器件和检测光学视场的限制, 检测只能在一定的温度范围内。为了获得三维任意范围的温度场分布, 有必要建立焊接温度场分析模型。C.C. Doumanidis 使用二个高斯分布的热叠加模型来计算温度场分布, 其模型参数由背面检测几个有限点的温度来确定^[2]。更加接近实际热源分布的模型是由 J.A. Goldak 等提出的双椭圆高斯分布热源模型, 但是其解析解没有推导出来^[3]。本文利用双椭圆高斯分布热源模型, 导出了 TIG 焊有限板厚温度场的数值计算模型, 利用背面检测的二维温度场辨识模型参数后, 计算获得了整个工件三维温度场分布。

1 二维焊接温度场检测系统

1.1 检测系统结构

检测系统如图 1 中虚框所示, 主要由双色传感器、计算机图象处理系统组成。关键是双色传感器, 它由光学成象器件、双色调制盘、ICCD 探测器构成。双色传感器的设计决定着双色热图象的质量, 实时动态检测能力, 传感器应具有灵巧、实用、快速、可靠等特点。本系统选择了单光路, 通过具有二个半圆滤光片的双色盘旋转切换得到双色热图象, 除了两滤光片的差异之间, 双色热图象具有相同的光路、接收元件, 系统简单、稳定性好。

1.2 焊接温度场实时检测

焊接温度场实时检测包括三个过程: 焊接热辐射图象的实时采集、热辐射图象的快速处理和区域温度场的获取、各个区域温度场的连接等。

对 TIG 焊过程的温度场进行检测, 其焊接及检测条件为: 不添丝、平焊位置, 焊件为低碳钢冷轧钢板, 大小为 $60 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, 保护气体为氩气, 气流量为 $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 焊接电流为 128A, 焊

* 国家自然科学基金(59475064)和江西省自然科学基金资助项目。

接电压为14V, 焊接速度为7.07 mm/s, 电极为钨, 直径为2.5 mm。传感器与熔化区距离310mm, 镜头光圈系数为11, ICCD 曝光时间分别选择0.1、0.5、2 ms, 相应温度场分三个区域: 高温、中温、低温区, 分别如图2(a)、(b)、(c)所示, 图2(d)为连接的整个温度场分布。

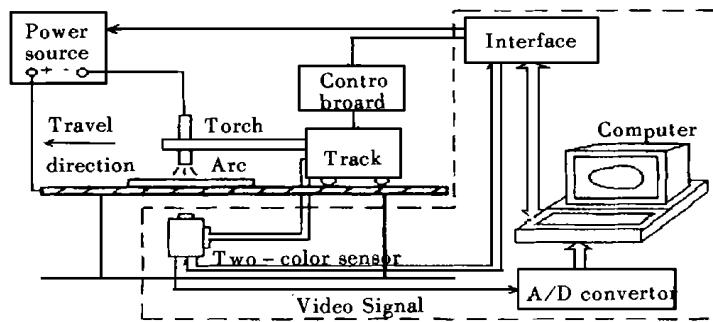


图1 双色热图象焊接温度场传感系统

Fig. 1 Sensing system with two-color thermal images for weld temperature field

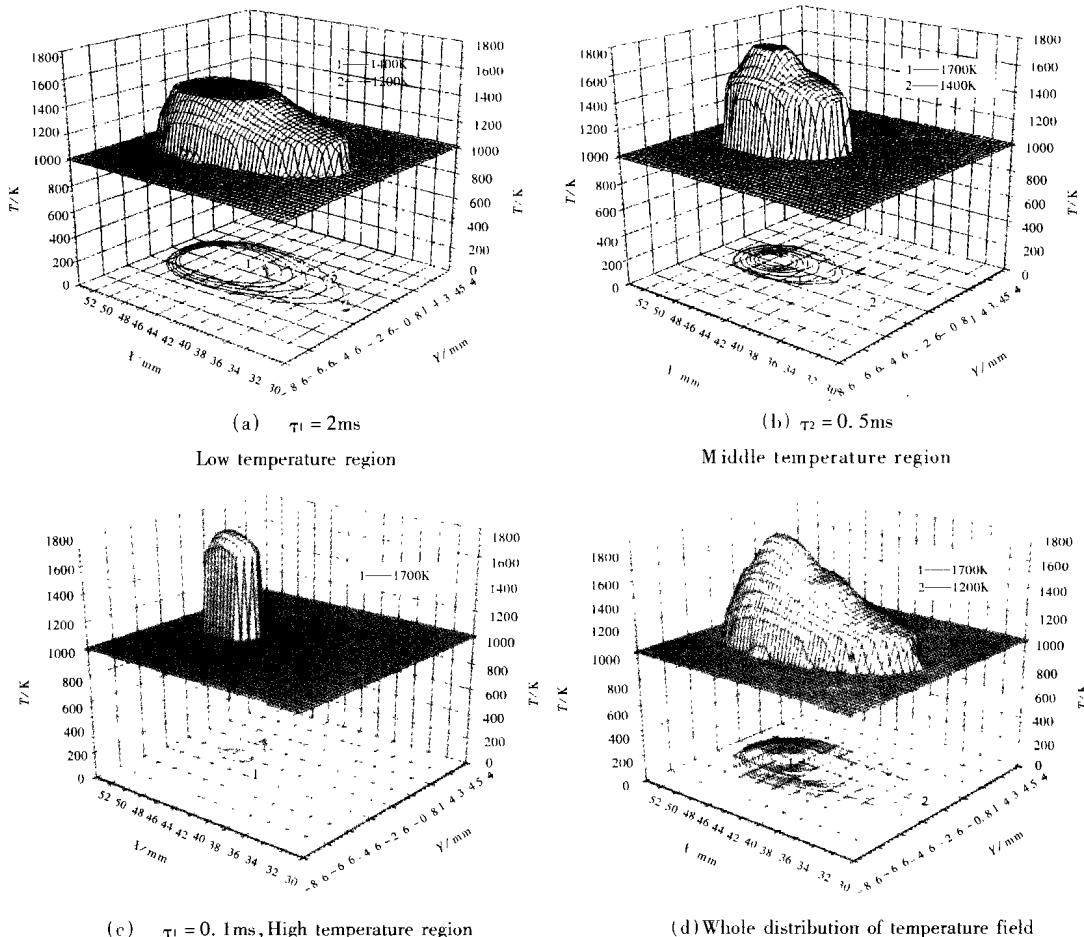


图2 焊接温度场各个分区及整个场的分布

Fig. 2 Distribution of each regions and whole field for weld temperature field

2 焊接温度场计算模型

2.1 温度场分析模型

焊接温度场的理论分析主要从焊接热源分布、热传递规律和工件边界条件等方面进行。热源对于半无限厚、无限大薄板、无限长细杆工件分别近似为点、线、面分布,通过热传导方程可以导出温度场的解析式。实际热源并非这些理想分布,一般情况即使在理想的边界条件下也无法得到温度场的解析式。但对于实际热源分布比较接近的高斯模型却可以从热传导方程得到温度场的解析式。这里采用与实际热源分布更为接近的双椭圆高斯热源模型,如图 3 所示,其热源功率密度为^[3]:

$$Q(x', y', 0, t') = \begin{cases} \frac{f_f q}{2\pi w_{x1} w_y} \exp\left[-\frac{x'^2}{2w_{x1}^2} - \frac{y'^2}{2w_y^2}\right] & x' > 0 \\ \frac{f_f q}{2\pi w_{x2} w_y} \exp\left[-\frac{x'^2}{2w_{x2}^2} - \frac{y'^2}{2w_y^2}\right] & x' < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 q 为热源有效功率, f_f, f_r 分别为总的输入功率在熔池前、后二部分的分配指数, $f_f + f_r = 2$, v 为焊接速度, w_{x1}, w_{x2}, w_y 分别为双椭圆热源分布参数, $x' y' z'$ 为随热源移动的坐标系。

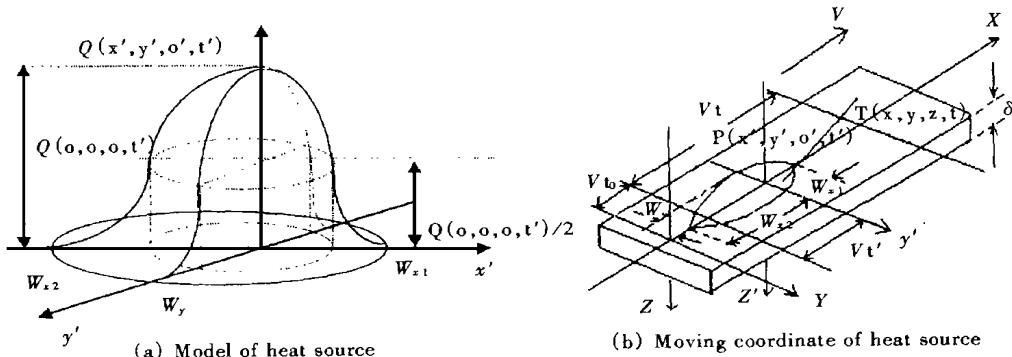


图 3 双椭圆高斯分布热源模型

Fig. 3 Double ellipsoidal Gaussian distribution model of heat source

将热源模型代入热传导方程,对于厚度为 δ 的薄板焊接,应用镜象法^[4]可导出温度场分布^[3]:

$$T(x, y, z, t) - T(x, y, z, 0) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \int_0^t \frac{1}{\rho c [4\pi a(t-t')]^{3/2}} \frac{q}{\pi w_y} \exp\left[-\frac{x^2+y^2+(z-2l\delta)^2}{4a(t-t')}\right] \cdot \left[\frac{f_f}{w_{x1}} \Delta_1 + \frac{f_r}{w_{x2}} \Delta_2 \right] \Delta_3 dt' \quad (2)$$

其中 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 见文献[5]。

将 $0 \sim t$ 时间划分为 p 个子域, 使用高斯积分得到温度场分布数值积分计算公式为:

$$T(x, y, z, t) - T(x, y, z, 0) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^N \frac{1}{\rho c [4\pi a(t-\sum N_i t_i)]^{3/2}} \frac{q}{\pi w_y} \exp\left[-\frac{x^2+y^2+(z-2l\delta)^2}{4a(t-\sum N_i t_i)}\right] \cdot \left[\frac{f_f}{w_{x1}} \Delta_1 + \frac{f_r}{w_{x2}} \Delta_2 \right] \Delta_3 \frac{\Delta t}{2} H_j \quad (3)$$

至此,建立了基于双椭圆高斯分布热源的焊接温度场分析模型和数值积分计算模型。同样可以建立高斯分布、线状连续移动等二种热源模型的温度场数值积分公式^[5]。

2.2 温度场分析模型比较

对三种分析模型进行数值计算, 计算与实时检测条件如表 1 所示。

表 1 理论计算与实时检测条件

Table 1 Theoretical calculation and condition of real-time measurement

Welding condition	Parameters	Computed condition	Parameters
Weldment	Mild steel ($60 \times 150 \times 2 \text{ mm}^3$)	Fluid density	7.68 g/cm^3
Protective atmosphere	Ar ($0.5 \text{ m}^3/\text{h}$)	Thermal diffusivity	$0.08 \text{ cm}^2/\text{s}$
Welding voltage	12V	Temperature conductivity	0
Welding current	60A	Specific heat	$0.679 \text{ J/(g. } ^\circ\text{C)}$
Welding speed	5mm/s	Thermal conductivity	$0.377 \text{ J/(cm. s. } ^\circ\text{C)}$
Electrode	Tungsten ($\Phi 2.5 \text{ mm}$)	Thermal efficiency	0.75

实时检测的温度场分布如图 4(a)所示, 图中 X0Y 面上的为 8 条等温线分布, 等温线间隔为 50K, 最内面一条温度为 1450K, 最外面一条温度为 1100K。双椭圆高斯模型参数为 $w_{x1}=0.10 \text{ cm}$ 、 $w_{x2}=0.30 \text{ cm}$ 、 $w_y=0.14 \text{ cm}$ 、 $f_l=0.6$ 、 $f_r=1.4$, 高斯模型参数为 $w=0.14 \text{ cm}$ ^[5]。双椭圆高斯分布热源、高斯分布热源、线状连续移动热源数值积分计算结果分别如图 4(b)、(c)、(d)所示。

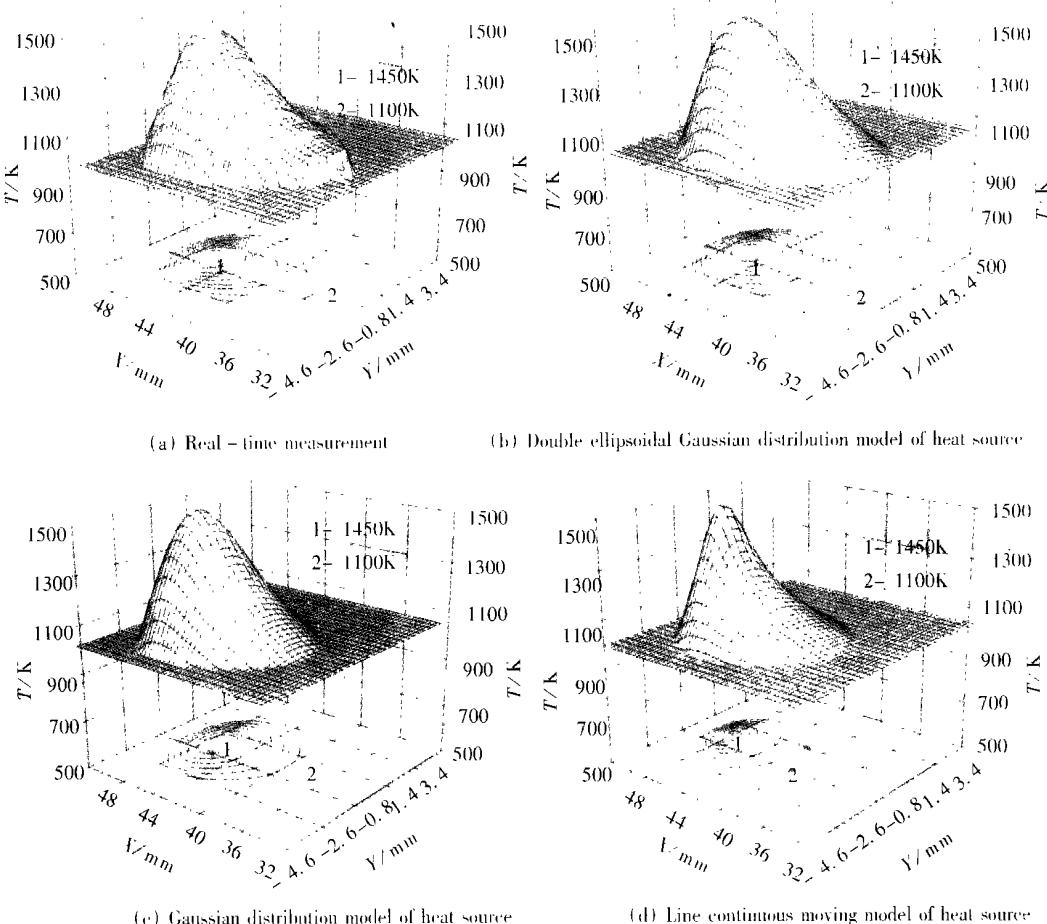


图 4 几种热源模型的温度场分布与实际检测结果的比较

Fig. 4 Comparison of temperature field distribution for various sources and practical results

比较三种热源模型计算的温度场图4(b)、(c)、(d)与实际检测的温度场图4(a),可以看出双椭圆高斯分布热源模型计算的温度场与实际检测的温度场最为接近,高斯分布热源模型计算的温度场相差较大,而线状连续移动热源模型计算的温度场则更大。从图5(a)、(b)更加清楚地可以看出各种热源模型计算的温度场相差很大,双椭圆高斯分布热源模型计算的温度场与实际检测的相当吻合,说明双椭圆高斯分布热源模型较好地反映了焊接电弧的功率密度分布。

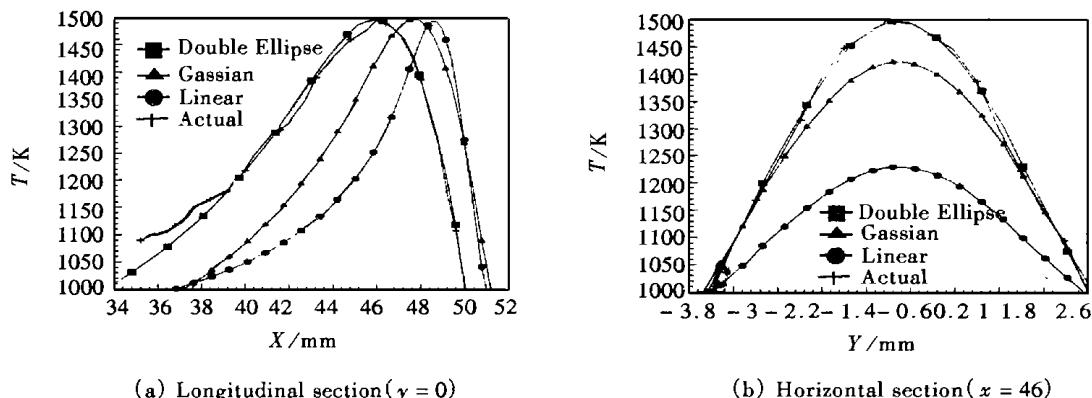


图5 三种热源模型计算与实际检测温度场纵向横向温度分布

Fig. 5 Longitudinal and horizontal section distribution of temperature field for three heat source models

3 二维温度场的外推和三维温度场的计算

3.1 二维温度场的外推

应用双椭圆高斯分布热源模型对工件背面温度场向低温外推,可进一步获得背面整个温度分布。图6为实际检测的温度场图4(a)的外推结果,图6(a)、(b)分别为背面纵向、横向一条线上的外推及实际检测的温度分布,从图6(a)中得出冷却时间 $t_{8/5}$ 为 3.6s,它是决定热影响区组织性能最重要的参数之一。

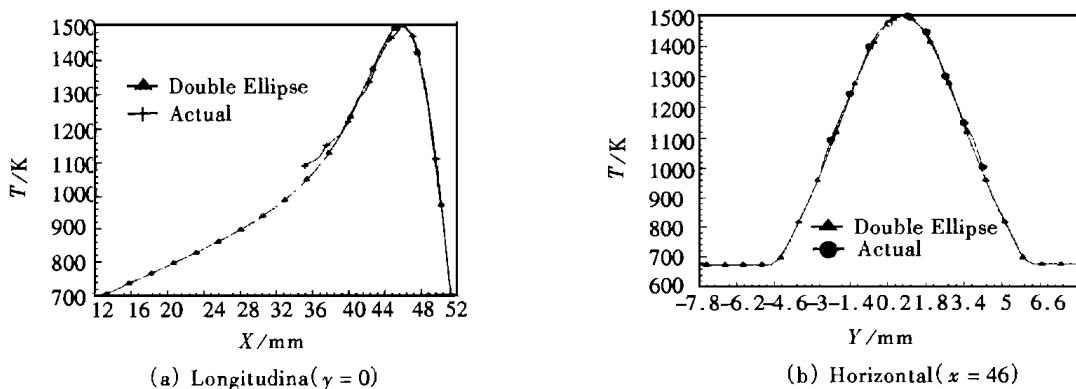


图6 焊接温度场及纵向横向温度外推分布

Fig. 6 Weld temperature field distribution and expanded distribution of longitudinal and horizontal section

3.2 三维温度场的计算

对背面温度场实时检测之后,利用建立的分析模型进行数值积分计算可以获得三维温度场的分布。图7(a)、(b)分别为计算的三维温度场横截面和纵截面温度分布,其相应的实时检测背面温

度场为图 4(a)。图 7(a)为在 $X=46\text{mm}$ 处横向截面温度场等温线分布, 图 7(b)为在 $Y=0$ 处纵截面温度场等温线分布。

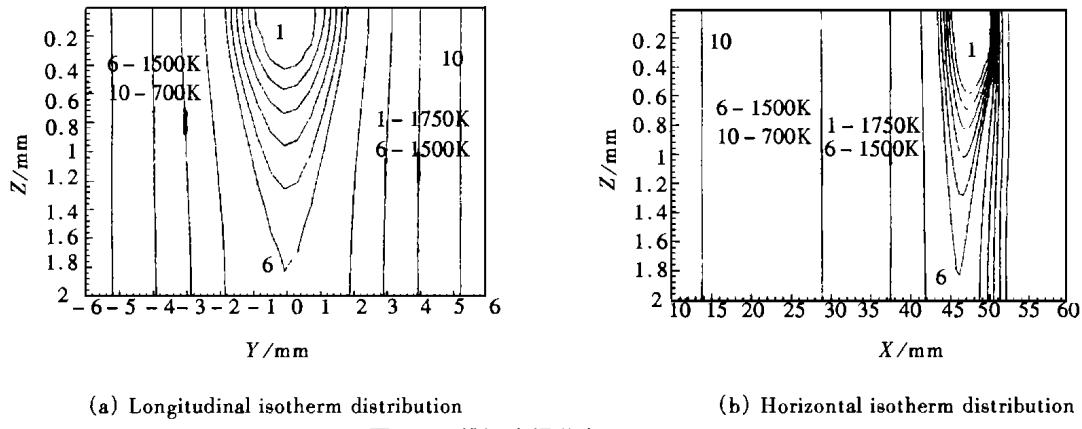


图 7 三维温度场分布 ($X=46\text{mm}$)

Fig. 7 Distribution of 3D temperature field

4 三维焊接温度场计算分布的验证

比较整个三维温度场的理论计算与实际检测的结果是困难的, 但是可以将计算的正面与背面熔宽与实际测量的熔宽进行比较, 以校验理论模型的准确性。

图 8(a)为焊接速度不变, 正面、背面熔宽随焊接电流变化的实际测量值与理论计算值比较曲线。图中试验条件: 焊接速度 7.07mm/s , 8 个不同的焊接电流、焊接电压数据见表 2。计算参数: 工件厚度 2mm , 双椭圆参数 $w_{x1}=0.15\text{cm}$ 、 $w_{x2}=0.35\text{cm}$ 、 $w_y=0.25\text{cm}^{1/3}$ 。其余条件如表 1 所示。图 8(b)为焊接电流不变, 正面、背面熔宽随焊接速度变化的实际测量值和理论计算值比较曲线。图 8 中焊接电流 165A 、焊接电压 15.4V , 总功率 2541W , 其余试验条件及计算参数与图 8(a)相同, 其中 8 个焊接速度数据分别为: $3.45, 4.08, 5.13, 5.17, 6.67, 7.41, 8.00, 8.70\text{mm/s}$ 。

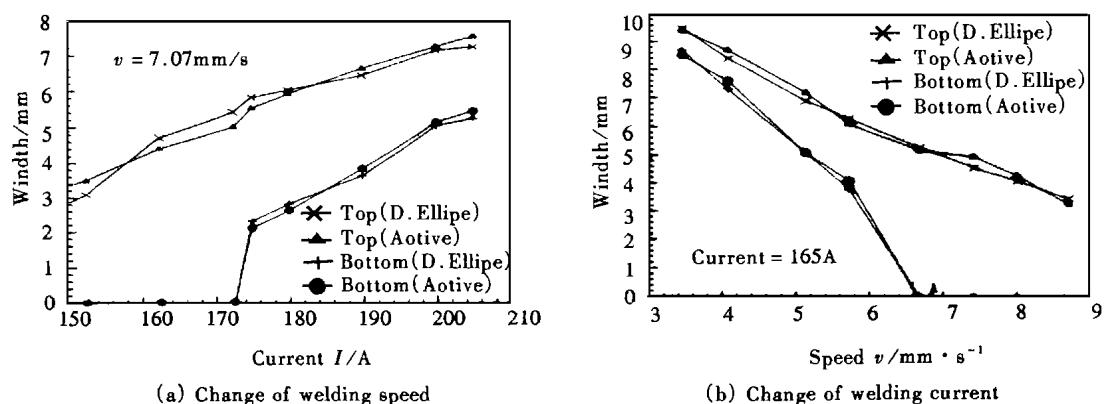


图 8 正面背面熔宽的计算与实测结果

Fig. 8 Computed and measured weld width on front and back surface

表 2 焊接电流和焊接电压数据

Table 2 Data of welding current and voltage

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
Welding current/A	152.5	162.5	172.5	175.0	180	190	200	205
Welding voltage/V	14.0	15.2	15.2	16.0	16.0	16.0	16.8	16.8
Whole power/W	2135	2470	2622	2800	2880	3040	3360	3444

从以上二图可以看出: 理论分析模型计算正面的熔宽与实际测量的误差比反面的要大, 但是相对误差不超过 8%, 因此可以利用理论分析模型获取正面熔宽信息。

5 结 论

(1) 完成了焊接温度场的实时检测, 获得了整个温度场信息, 满足实时检测要求, 从温度场中可实时提取等温线参数、热循环参数等, 为实时进行焊接冶金分析提供了基础。

(2) 利用焊接温度场实时检测的结果对各种分析模型进行校验, 证明双椭圆高斯分析模型的计算最接近试验结果。利用这种分析模型可外推计算出低温区和三维温度场分布信息。

(1999-01-04 收到初稿, 1999-09-20 收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 Zhang Hua, Liao Baojian and Pan Jiluan. Real-time measurement of temperature field by colorimetric method. SPIE Proceedings, Vol. 2894, 1996(11): 8~13.
- 2 Doumanidis C C. et al. A model for real-time control of arc welding processes. Trends in welding Journal, 1993(3): 107s~115s.
- 3 Shah A K. et al. Weld heat-affected zone in Ti-6Al-4V Alloy, part1—computer simulation of weld variables on the thermal cycles in the HAZ. Welding Journal, 1995(9): 297s~305s.
- 4 武传松. 焊接热过程数值分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
- 5 张华. 焊接温度场实时检测及其应用: [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 1997.

3D Simulation of Computer for Weld Temperature Field Based on 2D Measurement

Zhang Hua

(*Nanchang University*)

Pan Jiluan

(*Tsinghua University*)

Abstracts Real-time measuring system for weld temperature field is developed by colorimetric method using ICCD images and 2D temperature field distribution is achieved quickly by using the system. For TIG welding of thin plate on mild steel, various sources analytical models is verified by the 2D measured results. The 2D computed temperature by using heat source model of double ellipsoidal Gaussian distribution gives best agreement with the measured value. Wider range temperature and 3D temperature field distribution is on-line simulated by using the 3D temperature field numerical computed heat source model of double ellipsoidal Gaussian distribution and the measured 2D temperature field distribution as the boundary condition. The agreement between the theoretically simulated and experimentally measured weld width is shown excellently.

Key words two-color measuring temperature, weld temperature field, ICCD, simulation of computer

作者简介 张华, 1964 年 11 月出生, 博士, 教授, 博士生导师, 南昌大学机电研究所副所长。主要从事弧焊过程传感技术、焊接温度场实时检测与数值计算、焊接自动化与焊接质量控制、机器人智能控制技术等研究与教学。目前承担国家自然科学基金、江西省跨世纪学术带头人培养计划等课题研究, 发表论文 40 多篇, 其中已经被 SCI 收录 4 篇、EI 收录 10 篇。