

焊接熔池的数学模型及焊接 工艺参数的在线最优化

刚 铁 讲 师

(哈尔滨工业大学)

黄 地 尚 羲 副教授

(日本 大阪大学)

摘 要

用数学模型方法进行焊接过程的计算和预测,关键是选取合适的计算模型和模型参数。本文介绍了一种用红外测温,对所建立的熔池数学模型参数进行修正的方法。结果表明,修正后的模型基本反映了熔池形成的规律。在此基础上,就所给的焊道尺寸要求值进行了焊接工艺参数优化,取得了较为满意的结果。

	han	shu	can
主题词	焊接熔池	数学模型	参数

0 序 言

焊接生产中,选择最佳焊接工艺参数是保证焊接质量和提高生产率的重要前提。一般的方法是参考焊接手册,在实验的基础上确定焊接工艺参数。这种方法在改变工艺要求时,要重新摸索工艺参数,花费大量时间。为改变这种状态,许多研究者做了大量的工作,已有不少报道^[1~3]。但由于最佳焊接工艺参数的确定要受到许多因素的影响,目前尚存在一些问题。近年来,用数值计算方法建立数学模型^[4,5],解决焊接中的问题是一种新的,有效的手段。但在电弧焊情况下,焊接条件,材料状态等的变化均对熔池的形状有很大的影响,对于这些现象,计算模型的适应性如何,怎样选择合适的焊接工艺参数,仍有许多课题需要探讨。

从以上观点出发,本文研究建立了厚板的熔池数学模型,利用焊道表面的温度对模

型参数进行在线修正(所谓在线修正是指整个系统处于联机状态,进行参数的修正和优化时不需人员介入),用修正后的计算模型和优化方法,可以给出满足焊道尺寸要求的焊接工艺参数即最优值。本文介绍数学模型的建立和在线修正的方法并给出初步的实验结果。

1 熔池的数学模型

本文以热传导论为基础,建立熔池的数学模型。众所周知,固体内三维传热的微分方程式可表示如下:

$$c\rho\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (1)$$

式中 c ——比热 ρ ——密度
 T ——温度 k ——热传导率

一般来说,焊接时的热流是处于非稳定状态的,温度分布随时间变化,但在一定的条件下可以看成准稳定状态^[6]。为了缩短计算时间,本文采用热物理性能与温度无关的线性模型,且遵循下面的假设:

- (1) 在熔池内热流仍服从热传导方程式;
- (2) 热流以及熔池为准稳定状态;
- (3) 热源位于母材上方,且为圆状均匀分布。

基于上述假设,描写熔池三维传热的微分方程可由下式表示:

$$-v\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (2)$$

式中 $a = \frac{k}{c\rho}$ ——热扩散系数

v ——焊接速度

图1为本文所用的熔池模型。微分方程式的求解采用有限差分法,差分计算用超松弛迭代法。

当焊接热源为点热源时,微分方程(2)式的解可以由解析方式给出,但一般情况下焊接热源为分布热源。为了对所建立的熔池数学模型的可靠性进行评价,本文取热输入半径 R_H 足够小时的差分数值解与解析解相比较,其结果见图2。由图可知两者基本一致,图3为一计算例子。

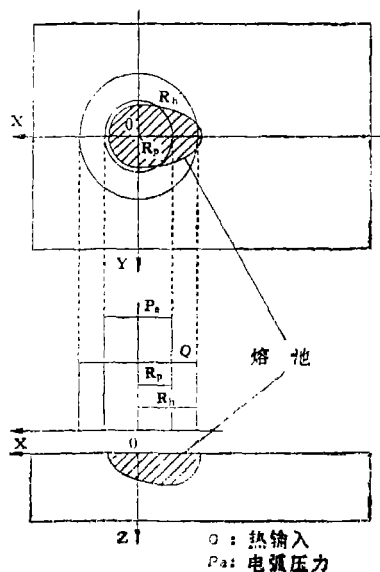


图1 熔池模型

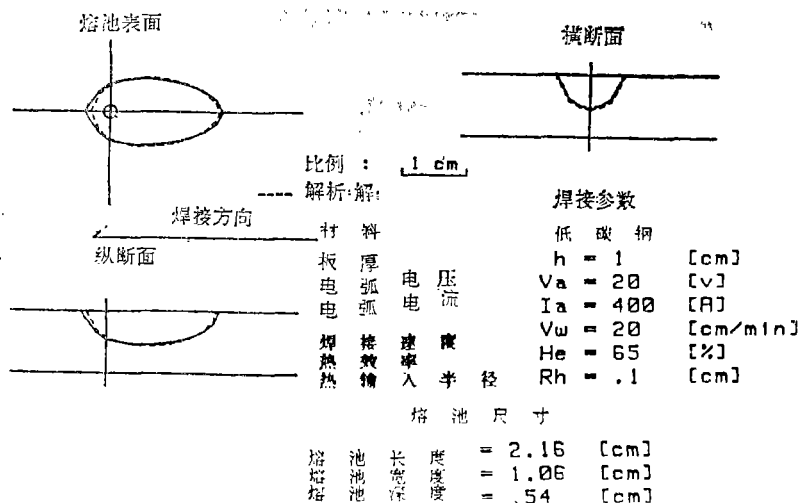


图2 差分解析和解析解的比较

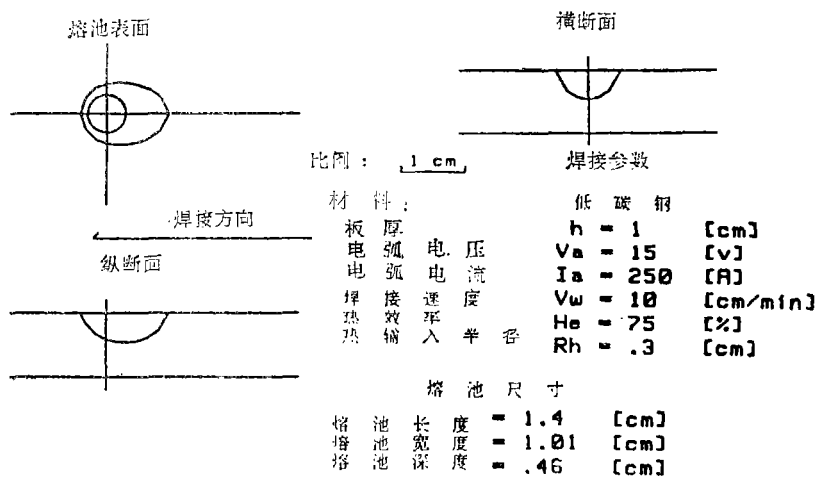


图3 计算例子

2 数学模型的在线修正及最优化方法

2.1 模型参数的在线修正

用数学模型准确地推算熔池尺寸的前提是所用的模型必须正确地反映熔池形成的规律, 因此, 关键是如何确定模型参数 (如热效率, 热输入半径等)。如果用一给定的模

型参数和焊接工艺参数所计算出的熔池及附近的温度与用相同焊接工艺参数施焊时, 对应点的实测温度接近的话, 可以认为所给的模型参数是恰当的, 那么用这个模型推算出的焊接工艺参数应是合适的。但是热效率、热输入半径等模型参数与焊接工艺参数有关, 往往难以事先给出一合适值。本文用点红外线温度计测量焊道表面的温度, 对给定的模型参数进行修正, 温度的测量方法见图4。在测量时将电弧电流降低进行采样, 避免电弧对温度测量的干扰^[7], 其测量结果与热电偶比较误差不大于5%。

根据测得的温度修正模型参数, 使对应点计算温度与实测温度趋于一致, 即求下式的最优解(极小值)。

$$F_1(\eta) = (T_1 - T_{s1})^2 + (T_2 - T_{s2})^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

式中 η ——热效率

T_1, T_2 ——温度的计算值

T_{s1}, T_{s2} ——温度的实测值

类似对于某一具体要求值(例如熔深 D_o) , 其最佳焊接工艺参数由下式算出。

$$F_2(I_a) = (D_o - D_c)^2 \rightarrow \min \quad (4)$$

式中 I_a ——焊接电流 D_o ——熔深要求值 D_c ——熔深计算值

2.2 最优化方法

求解最优化问题有多种方法, 如直接搜索法和梯度法等。本文所研究的是多维非线性最优化问题, 考虑在线修正的特点, 选用随机搜索法^[8], 其优点是:

(1) 当目标函数有若干个局部极小点时, 随机搜索法可用以求得全局极小点, 即对多峰问题是有效的。

(2) 由于目标函数急剧变化以及其它原因使各种寻优方法均失败时, 此法利用随机数寻求极小点仍可应用。

设问题是要求 $f(X)$ 的极小值, $X \in E^n$ (n 维空间), $l_i \leq x_i \leq u_i$, $i=1, 2, \dots, n$ 。式中 l_i 及 u_i 为变量 x_i 的上下限, 应用随机跳跃法产生若干组随机数 $r_1, r_2, \dots, r_n$, 并求 X ,

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 + r_1(u_1 - l_1) \\ l_2 + r_2(u_2 - l_2) \\ \vdots \\ l_n + r_n(u_n - l_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

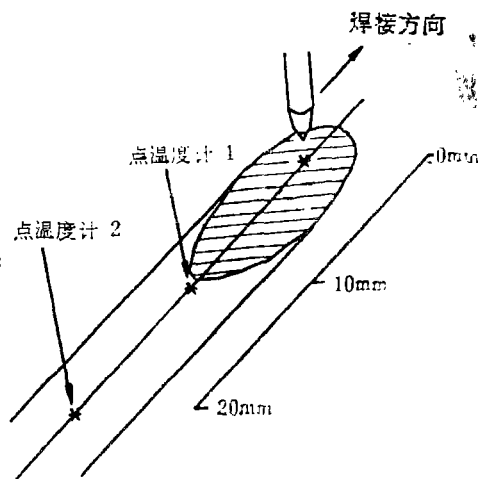


图4 温度测量方法

计算 $f(X)$, 取最小的 $f(X)$ 就是所求的最优解。

焊接工艺参数最优化基本思想示于图 5。对于某一要求值, 按照上述求解最优化问题的方法计算焊接工艺参数, 并按此工艺参数进行实验, 如果实验结果与计算值之间存在误差则修正模型参数, 然后重新计算焊接工艺参数, 如此反复进行求得最优问题解, 此过程在线自动进行。

3 控制方法与实例

本文按照上述的模型参数修正法和焊接工艺参数寻优法进行工艺参数的最优化。图 6 为最优化控制系统方框图, 图 7 为控制系统照片。由点温度计测得的温度信号经过

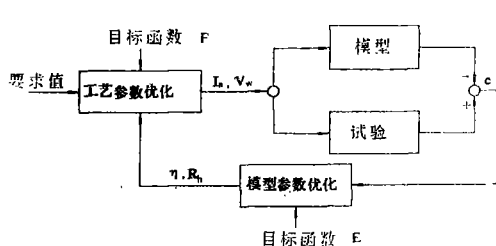


图 5 最优化基本方案

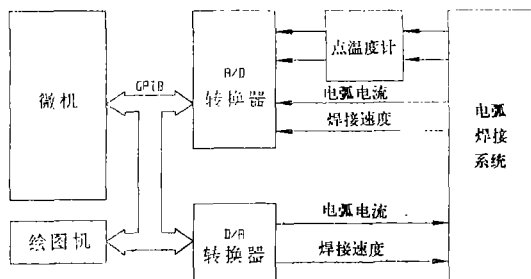


图 6 控制系统框图

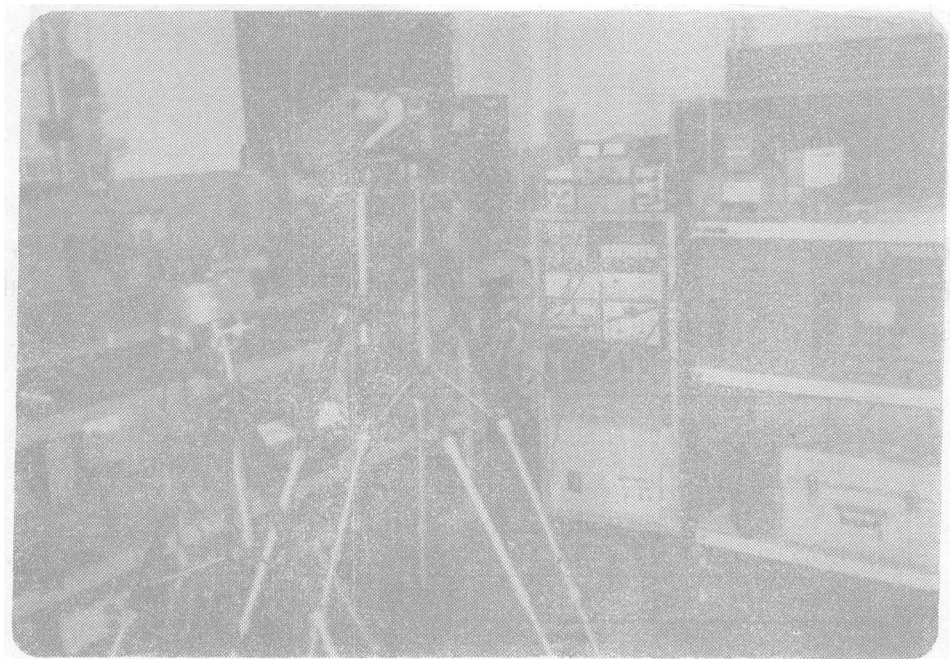
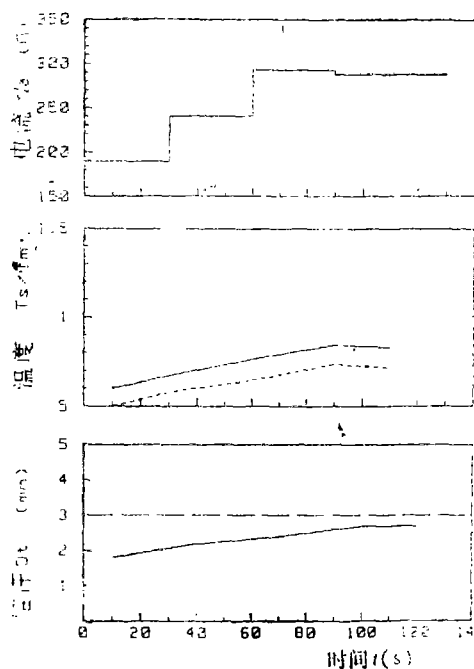


图 7 控制系统

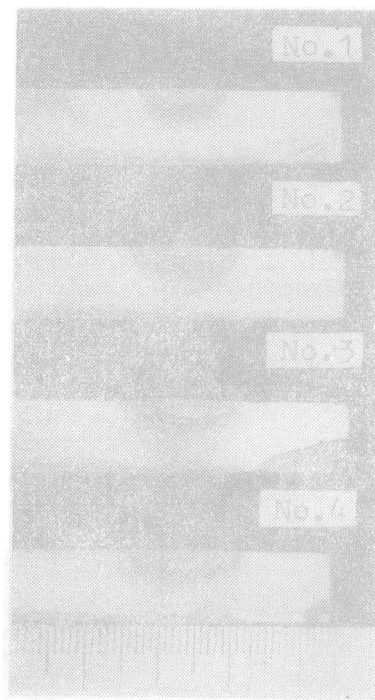
A/D转换器送入计算机, 根据这个信号修正模型参数, 利用修正后的模型算出焊接工艺参数, 通过D/A转换器送至焊机。如前所述, 为了满足在线最优化的要求, 本文采用随机搜索法, 先将计算出的各种焊接工艺参数以数据库形式存入存储区内, 根据不同的工

艺要求对计算出的焊接工艺参数进行优化。图8是一实验例, T1G焊, 板厚9.2mm, 低碳钢。图中 α 为热输入半径系数(即热输入半径= $\alpha \times$ 电流), 横轴为时间, 纵轴分别为焊接电流, 温度, 熔深的实测值, 以试件剖开后的金相腐蚀断面为准。表1为寻优过程。图9为各阶段的断面及熔深照片。本实验例进行修正的模型参数为热效率 η 。从表1和图9



要求值 $D_0=3\text{mm}$ 低碳钢 $\alpha=0.0026$

图8 在线最优化的实例



低碳钢 $\alpha=0.0026$

图9 最优化过程各阶段横断面

可以看出, 虽然初始模型参数给的较大, 焊道熔深较浅, 随着对模型参数进行修正, 焊接电流趋于稳定, 熔深也接近要求值, 此时的工艺参数即可以认为是较为合适的。由于试件长度有限, 表1中No.5只给出计算值。

表1 最优化过程

No.	1	2	3	4	5
$\eta(\%)$	97.2	70.8	57.8	50.8	50.8
ε	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
$I_a(\text{A})$	190.9	241.2	293.0	287.8	287.8
$D_t(\text{mm})$	1.8	2.2	2.4	2.7	

低碳钢 $\alpha=0.0026$ 要求值 $D_0=3\text{mm}$ $V\omega=10\text{cm/min}$

4 结 论

1. 以热传导论为基础, 建立了熔池的数学模型, 在热输入半径足够小时, 其有限

差分解和点热源的解析解基本一致, 满足实验要求。

2. 用红外线测温法对所建立的数学模型的模型参数进行修正, 使之基本反映了实际焊接熔池形成的规律, 在此基础上对给定熔深的焊接工艺参数进行在线优化, 得到了较为满意的结果。

(1988年7月25日收到)

参 考 文 献

- 1 Dubovetskii S V, et al. *Avt. Svarka*. 1980, 33(12):30~34
- 2 矢竹 等. 溶接学会講演概要. 1986, 38(4):196~197
- 3 Smith C T. Self-adaptive control of penetration in a tungsten inert gas weld, Third International Conference Promoted by TWI. 1974.
- 4 Ohji, et al. Technology Report of The Osaka University. 1986, 36(10):267~273
- 5 陈楚 等. 焊接学报. 1983, 4(3):139~148
- 6 Rosenthal D. *Welding Journal*. 1941, 20(5):230s~235s
- 7 小園 等. 溶接学会誌. 1986, 4(2):331~335
- 8 蔡宣三. 最优化与最优控制. 清华大学出版社, 1982.

MATHEMATICAL MODEL OF MOLTEN POOL AND ON-LINE OPTIMIZATION OF WELDING PARAMETERS

Lecturer Gang Tie

(Harbin Institute of Technology)

Associate Professor Takayoshi Ohji

(Osaka University, Japan)

Abstract

The key to a successful calculation and prediction of welding process by mathematical model method is the selecting of an appropriate model and its parameters. This paper introduces an infra-red means employed to identify the mathematical model parameters of molten pool. The results of experiments show the identified model essentially represents the way of molten pool forming. The welding parameters selected on the basis of the model may give fairly satisfactory results in the requisite pool size.

Key words Welding pool Mathematical model Parameter