

# 双丝焊热源模型\*

孟庆国 方洪渊 徐文立 姬书得

(哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室 哈尔滨 150001)

摘要：利用经典的双椭球形热源模型进行双丝焊温度场的计算，模拟结果与测量结果的对比表明此模型应用在双丝焊温度场的数值模拟中存在很大误差。通过对双丝焊电弧形态及熔滴过渡路径进行分析，发现双丝焊时前丝和后丝的电弧均向两丝中间偏转，利用此现象解释了模拟结果误差产生的原因。并以此为基础，对双椭球形热源模型进行修正，提出了双丝焊的热源模型，利用提出的模型进行计算得到的结果和测量结果吻合良好。

关键词：热源模型 双丝焊 温度场

中图分类号：TG44

## 0 前言

近年来，航空航天、交通运输和海洋工程等工业的发展，极大地推动了焊接技术的发展。伴随着产品，结构材料使用条件的多种多样，对焊接质量的要求越来越高，所以找到能够提高焊接生产效率和焊接质量，减少焊接缺陷存在的高效焊接方法成为实际生产的迫切要求。双丝焊由于焊接速度高，单位时间内焊缝成形的热输入小，热影响区小，接头力学性能高<sup>[1]</sup>，在工业上应用越来越广泛。焊后接头区域的变形及残余应力分析，是焊接工业比较关心的问题，数值模拟作为一种手段，对这些方面可提供有效的预测，但这要建立在得到准确的温度场基础上。所以一个好的热源模型是非常重要的<sup>[2]</sup>。热源模型发展到现在共有 5 种经典的模式<sup>[3]</sup>：

Rosenthal 的解析模式。 高斯热流分布函数。

半球状热源分布函数。 椭球形热源分布函数。

双椭球形热源分布函数。对于通常的焊接方法如手工电弧焊、钨极氩弧焊，采用高斯分布的函数就可以得到较满意的结果。但是对于电弧冲击力效应较大的焊接方法，如熔化极氩弧焊，常采用双椭球形热源分布函数。双丝焊作为一种新型的焊接方法，国内外还没有刊物对其热源模型作过相关报道，这大大限制了数值模拟方法在双丝焊应力变形预测上的应用。对双丝焊相关物理过程进行分析，在双椭球热源模型的基础上，提出了一种双丝焊的热源模型。

## 1 双丝焊温度场的初步模拟及试验

### 1.1 温度场的初步数值模拟

由于双丝焊属于熔化极气体保护焊，对熔池的冲击力比较大，所以对于这种焊接方法在初始计算时依据前人的经验采用双椭球形热源模型。下面为双椭球形热源模型表达式<sup>[4]</sup>。

前半部分椭球内热源分布为

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}Qf_1}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left\{-3\left[\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-vt)^2}{c^2}\right]\right\}$$

后半部分椭球内热源分布为

$$q(x,y,z,t) = \frac{6\sqrt{3}Qf_2}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left\{-3\left[\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-vt)^2}{c^2}\right]\right\}$$

式中  $Q = hUI$

$h$  —— 热源效率

$U$  —— 电源电压(V)

$I$  —— 电源电流(A)

$f_1, f_2$  —— 椭球能量分数，且  $f_1 + f_2 = 2$

$a, b, c$  —— 椭球形状参数，可有不同的值

焊件采用 2219 高强铝合金，尺寸为 400 mm×300 mm×5 mm，焊接规范如表 1 所示。

表 1 焊接规范

前丝焊 接电流	后丝焊 接电流	焊接速度	前丝电 弧电压	后丝电 弧电压	保护气	双丝间 隙
$I_0/A$	$I_1/A$	$v/(mm \cdot s^{-1})$	$U_0/V$	$U_1/V$		$d/mm$
151	133	15	19	18.5	氩气	7

### 1.2 双丝焊温度场测量试验

温度场测量试验采用镍铬—镍硅 K 型热电偶，在焊件与焊道垂直的中截面上取 8 个点进行温度的测量。测量点排布如图 1 及表 2。

\* 国家 863 高科技资助项目(2002AA305402)。20040613 收到初稿，20041010 收到修改稿

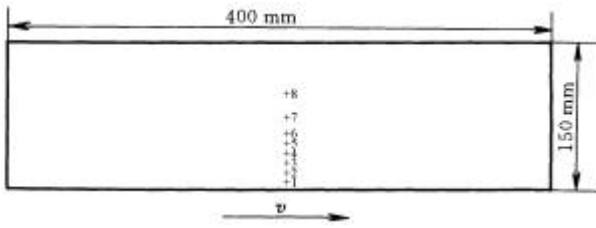


图 1 测温试验采集点分布示意图

表 2 采集点距离中截面垂直距离

采集点	1	2	3	4	5	6	7	8
距离焊缝 $d/mm$	6	10	15	20	30	40	60	80

### 1.3 试验及模拟结果对比

利用双椭圆形热源模型得到的热循环试验结果与计算结果分别为图 2 和图 3。通过两图比较可以看出，中截面节点的热循环趋势是相同的，焊接热源到达中截面之前，温度变化不大，之后温度快速升高，随着焊接热源远离中截面，温度较快地下降，但不及升温时迅速，焊接后随着冷却的进行，温度变化趋于平缓。但是试验测得的熔池边最高温度约 520，模拟结果却在 750 以上，误差很大。所以双椭圆形热源模型直接应用在双丝焊的数值模拟上是不准确的，必须进行修正。

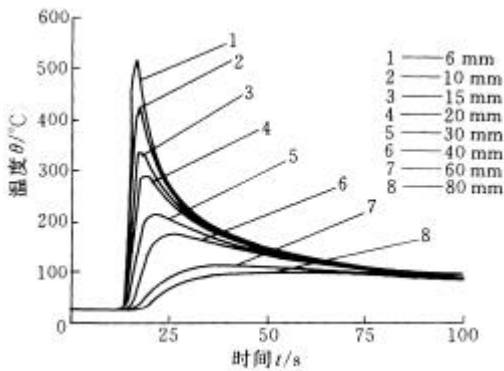


图 2 测量点试验得到的热循环曲线

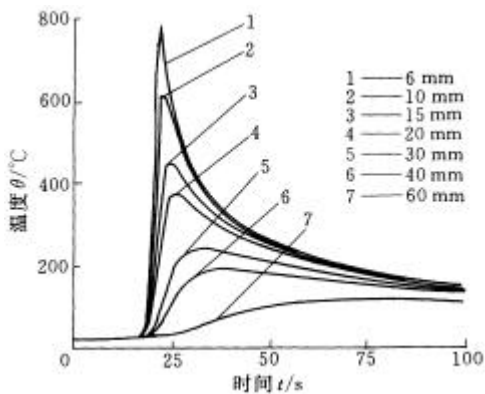


图 3 测量点模拟得到的热循环曲线

## 2 双丝焊电弧形态分析

为了考察误差产生的原因，做试验取得了双丝

焊时的电弧形态，从图 4 中可以看出，在刚起弧时电弧还能保持正常，但随着电弧增强，两丝电弧均向中间飘移。

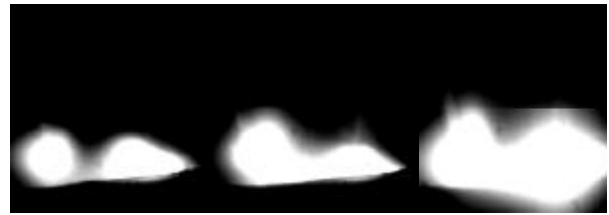
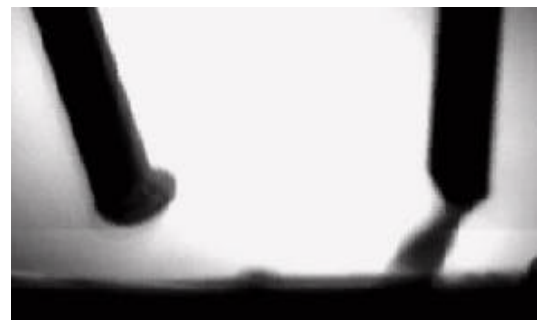


图 4 双丝焊电弧

在此基础上观察了熔滴过渡路径，图 5 分别为双丝焊时前丝和后丝熔滴过渡，很显然两丝的熔滴在过渡时都向中间发生了偏移，由于熔滴过渡方向主要受电弧推力影响，所以可以推断焊接时前后丝的电弧均向中间发生了偏转。



(a) 前丝熔滴过渡



(b) 后丝熔滴过渡

图 5 双丝焊熔滴过渡路径

考察原因认为双丝焊时的磁偏吹导致了电弧的偏转，如图 6 所示<sup>[5]</sup>，当两根焊丝的极性相同时，两根焊丝之间的磁场相减，电弧由于中间部份的磁场较弱而向中间偏移。磁偏吹对焊接并非有害无益，少量的磁偏吹有助于焊缝的成形以及控制熔渣、熔深。但是电弧偏转使得同能量的电弧作用面积增大，能量密度降低，而双椭圆热源模型没有考虑到电弧偏转，能量密度保持不变，所以导致模拟结果比试验结果大很多。这就是模拟结果不准确的主要原因。以下热源的修正正是在此基础上进行的。

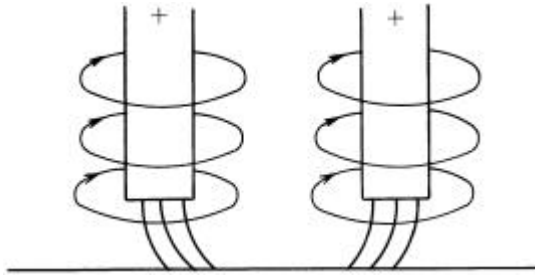


图 6 双丝焊时的磁偏吹

### 3 热源公式的修正

电弧的偏转从另一方面来说就是焊件发生了一定程度的偏转, 先以高斯热源为例, 示意图如下。

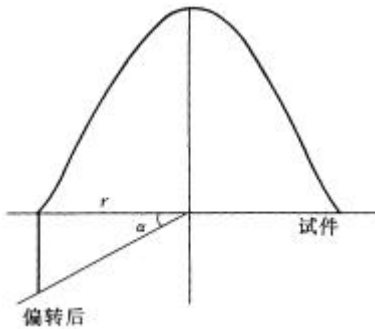


图 7 高斯热源偏转示意图

高斯热源公式为

$$q(r) = q(0)\exp(-cr^2)$$

则焊件逆时针偏转了  $\alpha$  角后, 可看出同样的能量密度分布的半径发生了变化, 变为  $r/\cos\alpha$ , 所以高斯公式变为

$$q(r) = q(0)\exp[-c(r/\cos\alpha)^2]$$

对于双椭球形热源模型, 根据双丝焊电弧形态分析得到的电弧偏转规律, 试件应绕熔宽方向偏转, 图 8 所示为试件逆时针旋转  $\alpha$  角。其中  $x$  为焊接方向,  $y$  为熔宽方向,  $z$  为熔深方向。修正公式推导如下。

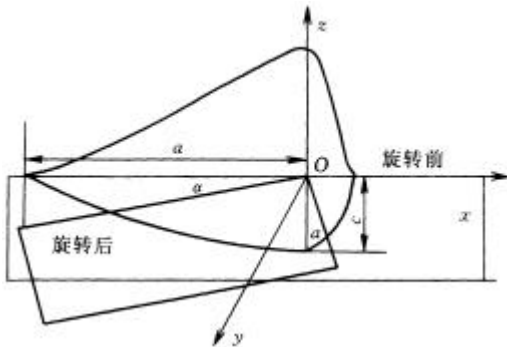


图 8 双椭球形热源模型旋转示意图

三维高斯热源能量密度分布公式为

$$q(x, y, z) = q(0)\exp(-Ax^2 - By^2 - Cz^2) \quad (1)$$

对此式在整个空间域上进行积分, 则能量关系满足

$$2Q = \iiint q(x, y, z) dx dy dz \quad (2)$$

积分结果为

$$\iiint q(x, y, z) dx dy dz = \frac{q(0)\pi\sqrt{\pi}}{\sqrt{ABC}} \quad (3)$$

所以 
$$q(0) = \frac{2Q\sqrt{ABC}}{\pi\sqrt{\pi}} \quad (4)$$

定义  $a, b, c$  为电弧正常时  $x, y, z$  方向热流密度降至  $0.05q(0)$  时的距离。由图 8 可看出在电弧偏转后,  $x, z$  方向热流密度降为  $0.05q(0)$  时的距离将分别变为  $a/\cos\alpha, c/\cos\alpha$ , 而  $y$  方向电弧没有偏转, 距离仍然为  $b$ 。所以

$$q\left(\frac{a}{\cos\alpha}, 0, 0\right) = q(0)\exp\left[-A\left(\frac{a}{\cos\alpha}\right)^2\right] = 0.05q(0) \quad (5)$$

$$q\left(0, 0, \frac{c}{\cos\alpha}\right) = q(0)\exp\left[-C\left(\frac{c}{\cos\alpha}\right)^2\right] = 0.05q(0) \quad (6)$$

$$q(0, b, 0) = q(0)\exp[-B(b)^2] = 0.05q(0) \quad (7)$$

解上三式可得

$$A = \frac{\ln 20}{\left(\frac{a}{\cos\alpha}\right)^2} \approx \frac{3}{\left(\frac{a}{\cos\alpha}\right)^2} \quad (8)$$

$$B = \frac{\ln 20}{b^2} \approx \frac{3}{b^2} \quad (9)$$

$$C = \frac{\ln 20}{\left(\frac{c}{\cos\alpha}\right)^2} \approx \frac{3}{\left(\frac{c}{\cos\alpha}\right)^2} \quad (10)$$

将  $A, B, C$  代入式(4)可求得  $q(0)$ , 然后将之带入式(1)可得热源公式为

$$q = \frac{6\sqrt{3}Q\cos\alpha^2}{\pi abc\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{3x^2}{\left(\frac{a}{\cos\alpha}\right)^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{\left(\frac{c}{\cos\alpha}\right)^2}\right] \quad (11)$$

考虑到椭球前半部分温度梯度不像实际中那样陡变, 而椭球的后半部分温度梯度分布较缓, 处理方法参照双椭球热源模型, 将能量分数  $f_1, f_2$  引入。且  $f_1 + f_2 = 2$ 。最后得到的热源公式为

前半椭球 
$$q = \frac{6\sqrt{3}Qf_1\cos\alpha^2}{\pi abc\sqrt{\pi}} \exp\left[-\frac{3x^2}{\left(\frac{a}{\cos\alpha}\right)^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{\left(\frac{c}{\cos\alpha}\right)^2}\right] \quad (12)$$

后半椭球

$$q = \frac{6\sqrt{3}Qf_2 \cos a^2}{\pi abc\sqrt{\pi}} \exp \left[ -\frac{3x^2}{\left(\frac{a}{\cos a}\right)^2} - \frac{3y^2}{b^2} - \frac{3z^2}{\left(\frac{c}{\cos a}\right)^2} \right] \quad (13)$$

需要注意的是此式为双丝焊单丝热源公式，将两单丝热源叠加即为双丝焊热源模型。

### 4 修正后计算结果比较

利用最后得到的双丝焊热源公式进行了与试验同样条件下温度场的数值模拟。根据试验结果，分别将前丝的电弧倾角取为 40°，后丝倾角为 30°，得到的热循环曲线结果如图 9 所示。

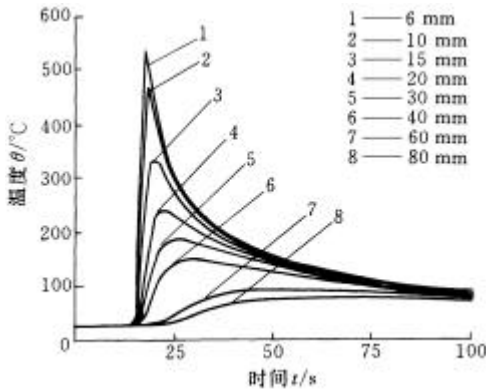


图 9 利用双丝焊热源模型的计算结果

将此结果与图 2 比较，峰值温度差异如表 3 所示，第二行为计算得到的结果，第三行为试验结果。由最后误差分析可看出两者最大差距不超过 30%，吻合较好。说明提出的双丝焊热源模型是很精确的。

表 3 计算结果与试验结果峰值温度对比

采集点	1	2	3	4	5	6	7	8
计算 $q_c$	530	460	330	250	190	148	83	70
试验 $q_t$	520	430	330	280	210	165	102	92
误差 $e$	10	30	0	-30	-20	-17	-19	-22

### 5 结论

- (1) 采用经典的双椭球形热源公式模拟双丝焊温度场，会产生很大偏差，必须进行修正。
- (2) 当两焊丝电流方向相同时，由于磁偏吹的影响，双丝焊的电弧形态与 TIG 焊时不同，两电弧均向双丝中心发生偏转。

(3) 在考虑电弧偏转和焊丝倾斜的基础上，推导出了适用于双丝焊的热源模型，该模型应用于双丝焊的温度场数值模拟的结果与试验结果吻合良好。

### 参 考 文 献

- 1 Cullison A. Modernization program features unique GTA welding operation. *Welding Journal*, 1990, 69(12): 53 ~ 57
- 2 Chong L M. Predicting welding hardness. In : M. Eng. Thesis. Ottawa, Canada : Carleton University, 1982 : 56 ~ 57
- 3 莫春立, 钱百年, 国旭明. 焊接热源计算模式的研究进展. *焊接学报*, 2001, 22(3): 93 ~ 96
- 4 John G. A new finite model for welding heat source. *Metallurgical Transactions*, 1984, 15B (2): 299 ~ 305
- 5 王立柱, 王旭, 王旺埔, 等. 电弧磁偏吹的产生及控制. *钢管*, 1999, 28(5): 20 ~ 23

## HEAT SOURCE MODEL FOR TWIN WIRE WELDING

Meng Qingguo Fang Hongyuan  
Xu Wenli Ji Shude

(State Key Laboratory of Advanced Welding  
Production Technology, Harbin Institute of  
Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** The temperature field of twin wire welding is calculated by using classical double ellipsoid heat source model. After comparing the simulating results with the measuring results it shows that when applying this model to the numerical simulation of twin wire welding's temperature field there exist big errors. By analyzing the arc shape and droplet transition path of twin wire welding, the phenomena that front arc and rear arc of twin wire welding deflect to the middle of the two wires is found. This phenomenon explains the reason of simulating results' errors. Based on this phenomenon the double ellipsoid heat source model is amended and the heat source model of twin wire welding is presented. This model's calculating results anastomose well with the measuring results.

**Key words:** Heat source model Twin wire welding  
Temperature field

作者简介: 孟庆国, 男, 1978 年出生, 博士研究生。主要研究方向为焊接过程数值模拟。

E-mail : mqg66@0451.com