

不锈钢焊接温度场的三维数值模拟

董志波¹, 魏艳红¹, 刘仁培², 董祖珏²

(1. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产国家重点实验室, 哈尔滨 150001;
2. 机械科学研究院哈尔滨焊接研究所, 哈尔滨 150080)

摘要: 分别详细分析了焊接热源的三种计算模型即高斯热源模型、双椭圆高斯热源模型及双椭球热源模型的数学表达式与物理特点。利用三维有限元网格划分技术, 对工件进行网格划分, 并采用网格自适应技术对焊缝金属的网格进行自动加密与生成, 为缩短焊接过程数值模拟时间创造了条件。在此基础上又对其中两种焊接热源模型所建立的温度场进行了计算, 得到了不锈钢 SUS310 材料温度场的分布规律, 研究了各种参数对温度场分布的影响, 并与工艺试验结果进行了比较, 提出了适合三维有限元分析的最佳焊接热源模型。

关键词: 热源模型; 焊接温度场; 数值模拟

中图分类号: TG44

文献标识码: A

文章编号: 0253-360X(2004)02-09-06

董志波



0 序言

焊接热过程的准确计算是定量计算焊接冶金、焊接应力应变分析和焊接过程自动化控制的前提。焊接热过程取决于外加热源的分布形式、材料的热物理性能以及材料与周围的换热等因素。经典的雷卡林公式以点、线、面分布热源来模拟各种焊接热源, 有一定的局限性。焊接过程数值模拟的研究早期一直停留在二维水平上^[1]。近年来, 随着计算机技术和有限元技术的发展, 焊接过程三维数值模拟的研究成为该领域的研究前沿。但是由于焊接过程的复杂性, 焊接过程的三维数值模拟仍只停留在以典型接头作为研究对象^[2], 在实际应用中仍有较大的局限性。影响数值模拟技术在实际生产中得到应用的主要原因是计算时间过长或计算精度不高, 这主要是下述因素造成的:(1) 焊接结构三维模型中自由度数目庞大;(2) 严重的材料非线性导致求解过程的收敛困难;(3) 高温区的存在使得控制数值模拟的精度和稳定性存在一定的困难。

文中以三种焊接热源模型 经典高斯热源^[3]、表面双椭圆高斯热源^[4]及双椭球形热源^[5]为研究对象, 利用其中两种热源模型对不锈钢 SUS310 三维焊接温度场进行了数值模拟, 在此基础上又把模拟结果与工艺试验结果进行了比较, 通过比较提出了更接近实际的热源模型。同时还采用网格自适应划

分技术, 对焊缝金属的网格进行了划分, 这一技术处理大大缩短了计算时间, 为该方法在复杂结构上的推广奠定了基础。

1 热源模型

1.1 高斯热源模型

在经典雷卡林公式中, 点热源和线热源主要用于温度场解析解, 研究表明其计算结果与实际结果有较大的出入, 而高斯热源分布是一种比点状热源和线热源更切实际的一种热源分布函数, 因为它将热源按高斯函数在一定的范围内分布, 其分布特点如图 1 所示^[3]。

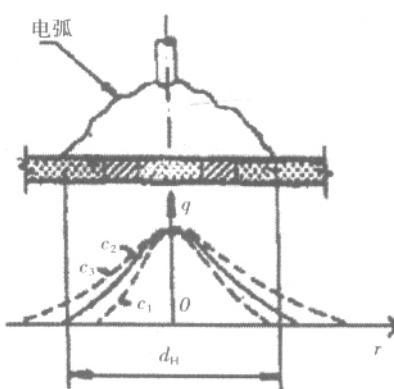


图 1 高斯热源模型 ($c_1 > c_2 > c_3, d_H$ 电弧有效范围)

Fig.1 Gaussian heat source ($c_1 > c_2 > c_3$)

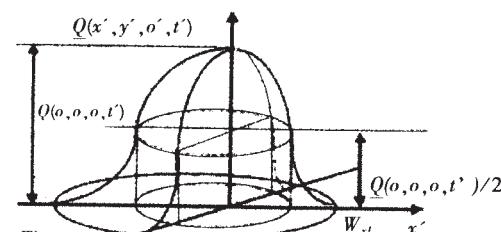
高斯模型热流密度为

$$q^* = q_{\max}^* \exp(-cr^2), \quad (1)$$

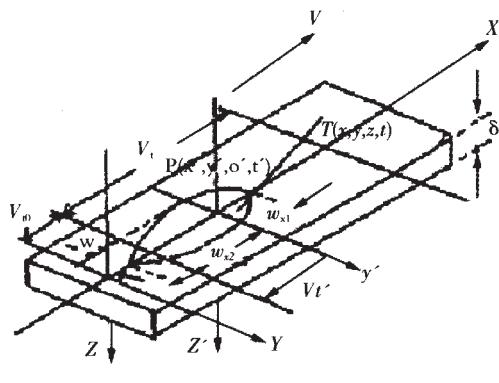
式中 q^* 为半径 r 处的表面热流 q_{\max}^* 为加热斑点中心的最大热流 c 是热源集中系数, 与焊接方法相关的常数 r 为距热源中心的距离。文中 c 取为 0.05 mm^{-2} , r 为 3 mm。有关试验研究表明, 高斯热源模型能够表征焊接电弧的热流分布特征。

1.2 双椭圆高斯热源模型

焊接热源模型是否选取适当, 对焊接温度场的计算精度, 特别是在靠近焊接热源的高温区, 有很大的影响。在研究高斯热源模型热流分布的基础上, 有关研究认为双椭圆高斯热源模型比高斯热源模型, 更加接近实际焊接热源, 其热流分布特点见图 2^[4]。



(a) 热源模型



(b) 热源移动坐标系

图2 双椭圆高斯分布热源模型

Fig. 2 Double ellipsoidal Gaussian distribution model of heat source

热源功率密度的数学表达式为

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

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、后两部分的分配指数 $f_f + f_r = 2$, 通常 f_f 取 0.6, f_r 取 1.4; 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。

1.3 双椭球形热源模型

高斯热源模型和双椭圆高斯热源模型都是在二维计算时取得的面热源形式, 它没有考虑电弧在熔深方向的加热作用。事实上, 三维的热源模型计算才能真实体现焊接的热过程。Goldak^[5] 研究并提出了双椭球形热源模型如图 3 所示。

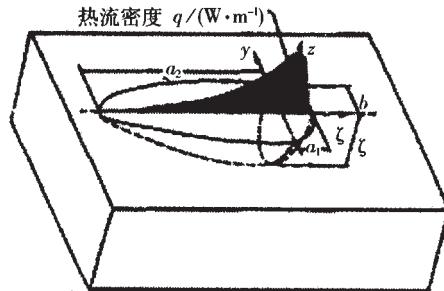


图3 双椭球形热源模型

Fig.3 Double ellipsoid heat source configuration

前部分是个 $1/4$ 椭球, 后半部分是另 $1/4$ 椭球。 f_f, f_r 与双椭圆高斯热源模型中含义相同, 则在前半部分椭球内热源分布为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_1 b c \pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a_1^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3z^2/c^2} . \quad (3)$$

同样, 对后半部分椭球内热源分布为

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_2 b c \pi \sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a_2^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3z^2/c^2} . \quad (4)$$

在式(3)(4) 中参数 $a_1 a_2 b c$ 可有不同的值, 它们是相互独立的。文中取 a_1 为 0.8 mm, a_2 为 3.2 mm, b 为 6.5 mm, c 为 1.5 mm。

在上述三种热源模型中, 经典的高斯热源模型较早提出, 并已在二维焊接温度场研究中被广泛应用。双椭圆高斯热源模型在文献[4]中进行了研究, Goldak 提出的双椭球热源模型在数值模拟中被应用的情况较少, 为了研究其合理性, 文中对经典高斯和双椭球形两种热源模型进行了焊接温度场的数值计算, 并研究有关参数对温度场的影响。

2 焊接过程物理模型的建立

2.1 控制方程

三维非线性瞬态热传导问题的控制方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (k \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) + \bar{Q} , \quad (5)$$

式中 ρ 为材料的密度, k 为材料的导热系数和比

热,它们是温度的函数 \bar{Q} 是内热源强度。

2.2 三维有限元模型的建立

利用所建立的三维焊接热传导过程的数学模型,对SUS310不锈钢材料进行了分析计算。模型尺寸为160 mm×120 mm×10 mm,由于对称性取其一半进行分析,网格划分见图4。

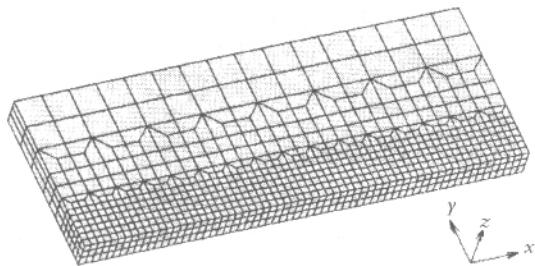


图4 有限元网格初始划分

Fig.4 Finite element mesh used for temperature calculations

焊接是一个温度随着空间和时间都急剧变化的过程,温度梯度很大,因此网格划分时在焊缝金属及其附近区域进行了细分,而在远离焊缝的地方网格可以划得较粗,并且在模拟计算中焊缝金属及其附近区域使用网格自适应划分技术,此处网格不必划得太细,自适应技术使网格细分区域只集中在焊缝金属及其附近,大幅度地减小单元数量。

2.2.1 焊接热源

焊接热源采用经典高斯热源与双椭球形两种热源模型进行计算,热源的移动及数学模型通过自定义的子程序实现。

2.2.2 边界条件

焊件边界与周围介质进行换热,热量的散失主要通过热辐射换热和对流换热方式进行的,高温下散失的热量以辐射为主,低温下以对流为主。在模型的对称面处取绝热边界条件。

对于对流换热:根据牛顿定律,对于某一与流动的气体或液体接触的固体表面微元,其对流换热密度 q 通过对流换热系数 H 与固体表面温度 T_s 和环境温度 T_∞ 之差成比例,如下式

$$q = H(T_s - T_\infty) \quad (6)$$

对于辐射换热:根据斯蒂芬-波尔兹曼定律,受热单元的单位表面、单位时间辐射的热量,即其辐射换热密度 q ,通过热辐射系数 σ 、黑度 ε 与固体表面 T_s 和环境温度 T_∞ 之差成比例,如下式

$$q = \sigma \varepsilon (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (7)$$

2.2.3 熔池内的液体流动

熔池内流体的流动增加了材料的热传导速度,对焊接过程的温度场有重要的影响。作者采用增大

有效热传导系数的方法,来间接地考虑熔池内流体流动对整个温度场的影响,增大热传导系数的处理方法见文献[7]。

2.2.4 相变潜热的影响

相变潜热对焊接温度场的分布有着重要的影响,文中采用潜热释放率与金属凝固分数成正比的方法,可用下式表示

$$q_i = \Delta H \frac{\partial f_s}{\partial T} \quad , \quad (8)$$

式中 ΔH 为单位体积的熔化潜热, f_s 为固相分数,固相分数随温度变化率可通过液淬法得到[7]。

2.2.5 材料的物理性能

SUS310型单相奥氏体钢材料的热物理性能参数见表1[8],它们是温度的函数。

表1 SUS310热物理性能与温度的关系

Table1 Relationship between material physical properties and temperature

温度 $T/^\circ\text{C}$	热导率 $\lambda (\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{C}^{-1})$	比热 $c (\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1})$	熔化潜热 $q_i (\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{C}^{-1})$
0~	15.013+1.363 x		
1250	$10^{-2} T$		
1250~		$4.109 \times 10^6 +$	2.58×10^6
1340		$1.138 \times 10^3 T$	
1340~	$56.8 + 1.98 x$		1.326×10^7
1375	$10^{-2} T$		
1375~			6.496×10^7
1400			
>1400	84.52	5.7026×10^6	

2.2.6 网格自适应技术

由于焊接过程中,只有焊缝附近温度高且经历了快速的温度变化,而文中采用动态自适应网格划分方法,焊缝处及其附近区域单元在一定的误差准则基础上自动细分两级,即在x、y、z方向上分别为 $2^{2=4}$ 份,其它部分的单元保持不变,这样大大减少了模型中的单元数目,从而降低了计算时间。当施加了边界条件的单元被细化后,程序会自动在新增加的边界节点上施加相应的边界条件,自动将新增加的单元置于原来单元所属的集合中,以便后处理时提取。该文在焊接温度场的计算过程中采用了求解梯度误差准则。

先决定结构中最大温度梯度 g_{\max} ,对第*i*个单元的温度梯度 g_{el} ,如果下列误差准则不满足,则需细化该单元

$$g_{el} > f_1 g_{\max} \quad ,$$

式中 f_1 为用户定义的误差准则系数[9]。

3 焊接过程数值模拟结果

3.1 两种热源模型得到的温度场

对焊接过程的三维数值模拟的全部工作是在商用软件 MARC / MENTAT 上运行计算的。在求解过程中对整个时间域划分为焊接过程和冷却过程两部分。每一过程分别采用固定时间步，焊接过程共用 70 s 完成，每 0.1 s 为一个时间步，冷却过程共用 200 s，每 0.25 s 为一个时间步。对于两种热源模型采用相同的焊接参数和载荷情况，通过不同的子程序控制热源计算模型。

图 5 为利用双椭球形热源模型，在焊接时间为 50 s 时得到的三维焊接温度场云纹图分布。

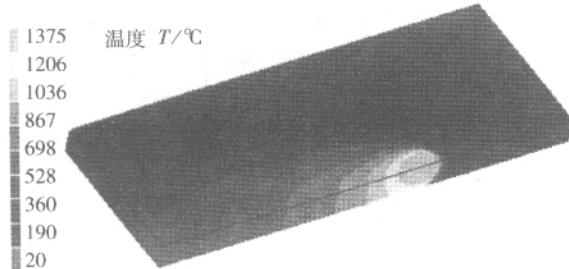


图5 双椭球形热源模型计算得到的三维温度场

Fig. 5 Three dimensional temperature distributions of double ellipsoid model

图 6 为焊接时间 50 s 时的高斯热源模型与双椭球形热源模型计算得到的温度场云纹图分布，从图中可以看出热源模型的不同，对于焊接温度场分布有着极其重要的影响。

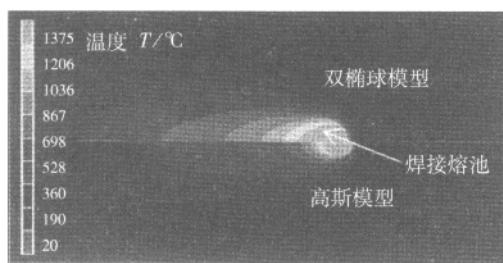


图6 两种热源模型焊接温度场云纹图

Fig. 6 Temperature distributions of two models

两种热源模型计算得到的熔池形状也有很大的差别见图 7。

从两个图中可以看出，对于高斯热源模型，其焊接熔池形状呈圆形且熔池较小，而双椭球形热源模型得到的焊接熔池形状呈双椭圆形，比高斯计算得到的熔池要大。

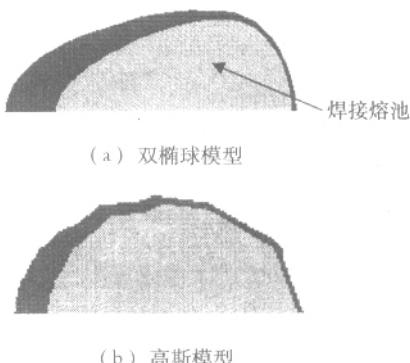


图7 两种热源模型计算得到的熔池形状

Fig.7 Fusion shape of two models

3.2 间接考虑熔池内流体流动对温度场的影响

焊接熔池内的对流传热加快了传热过程，因此是否考虑熔池内的对流传热对温度场分布有着重要的影响，图 8 显示了模拟结果。

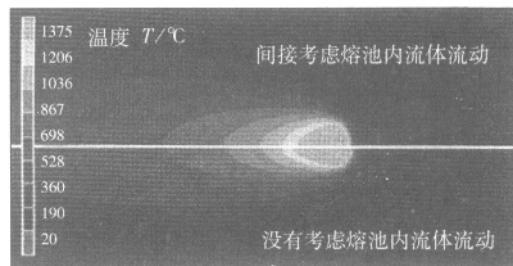


图8 间接考虑熔池内流体流动对温度场的影响

Fig.8 Influence of fluid flow on temperature distributions

从图中可以看出，当间接考虑了熔池内流体的对流传热影响时，计算出的熔池尺寸及附近温度场等温线的分布比不考虑对流传热时变宽、变短了，而对远离熔池处的温度分布的影响不大。

3.3 焊接参数对温度场的影响

该文给出了两种焊接条件，第一种 $I=200 \text{ A}$, $U=13.5 \text{ V}$, $v=2 \text{ mm/s}$ ；第二种 $I=325 \text{ A}$, $U=16.5 \text{ V}$, $v=4 \text{ mm/s}$ ，计算得到的温度场分布见图 9。

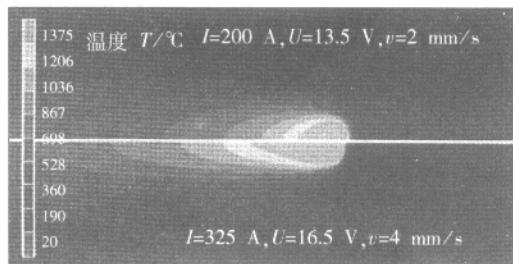


图9 焊接参数对温度场分布的影响

Fig.9 Influence of welding parameters on temperature distributions

可以看出，在焊接热输入相同的情况下，焊接参

数的改变,等温线的形状和尺寸也发生了很大的变化。在大电流高速焊时,等温线分布比小电流低速焊时窄而且长,因此,在相同线能量下,焊接参数不同对温度场分布也有着重要的影响。

3.4 凝固潜热对温度场的影响

材料SUS310为完全奥氏体不锈钢,不存在固态相变,故只需考虑凝固潜热对温度的影响,而对凝固潜热进行不同的处理,对焊接温度也有着重要的影响。

对潜热进行两种不同的处理,得到的温度场分布有着很大的差别,见图10。利用潜热均匀释放方法得到的熔池部分比采用潜热分段线性释放方法得到的要小,而较远处差别不大。

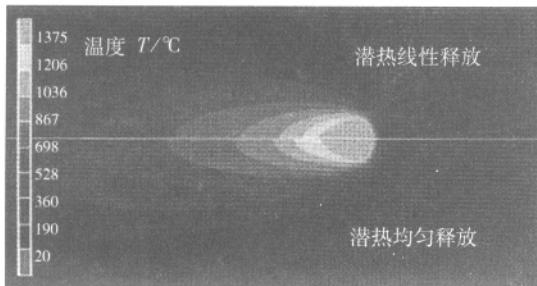


图10 潜热的不同处理方式对熔池形状的影响
Fig.10 Effect of different treatments of latent heat on the temperature distributions

3.5 网格自适应技术对温度场的影响

图11为两种网格划分技术对热影响区温度分布的影响。

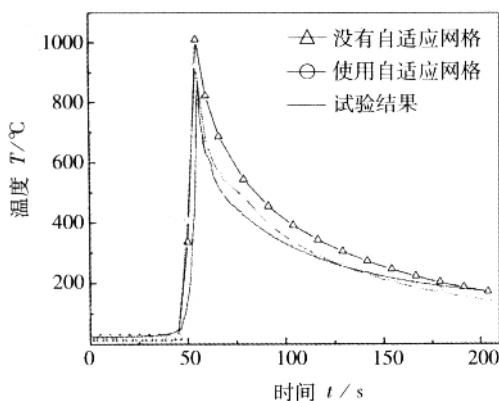


图11 热影响区温度分布曲线
Fig.11 Temperature change with the time-step

从热循环曲线分布情况可以看出,在高温部分两种方法得到的温度分布几乎一致,但随后的降温过程中,出现了较大的差别,并且采用自适应技术得到的模拟结果与试验测量结果更接近。

4 数值模拟结果的试验验证

为了验证数值模拟结果的准确性,文中采用钨极氩弧焊,对厚度为10 mm的SUS310不锈钢材料进行焊接,焊接参数采用200 A电流,13.5 V电压,2 mm/s的焊接速度。

焊接过程中采用热电偶法对焊缝热影响区温度进行了测量,并对焊接后试样的熔宽进行了测量。

图12为焊接时间50 s时,在垂直于焊缝中心线方向的工件上表面的温度分布,可以看出双椭球形热源模型比高斯热源模型更接近于测量的试验结果。

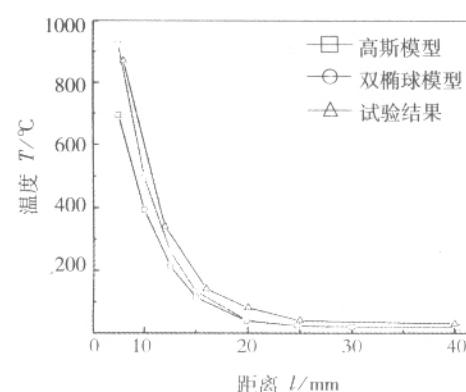


图12 垂直焊缝方向的工件上表面的温度分布
Fig.12 Comparison between the simulated temperatures and measured ones

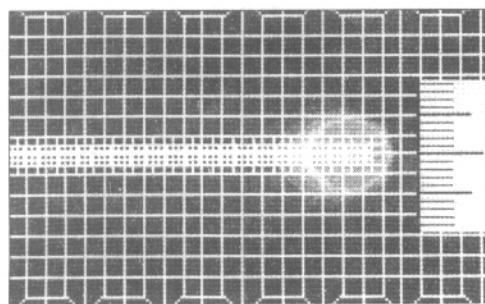
高斯热源模型和双椭球形热源模型计算得到的焊缝熔宽结果如图13a,b所示,并与试验测量的焊缝熔宽图13c进行了比较,经过比较可以得到表2的结果。

表2 计算结果与试验结果比较

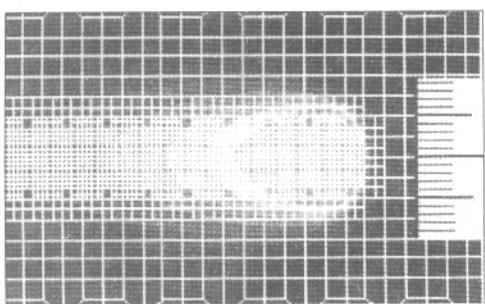
Table 2 Comparison between simulated results and experimental ones

	双椭球模型	高斯模型	试验结果
熔宽 W/mm	12.5	9.5	13.0

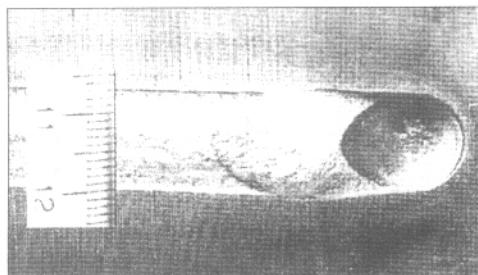
从数值模拟与试验结果的比较中可以得到,双椭球形热源模型计算得到的温度场分布,熔池的形状和大小,以及焊缝的熔宽结果与实际结果较好地吻合,而高斯热源模型相差较大,因此对于厚板的三维数值模拟,双椭球形热源模型比高斯模型更接近实际情况。



(a) 高斯热源模型熔宽和形状



(b) 双椭球热源模型熔宽和形状



(c) 试验测量的熔宽和形状

图13 焊缝的熔宽及熔池形状

Fig.13 Fusion width and shape of the weld

5 结 论

(1) 分析了高斯热源和双椭球热源的数学及物理模型，并对其进行了三维的温度场的数值模拟，

分析了温度场的动态变化过程。

(2) 在进行三维温度场的模拟过程中，引入了自适应网格划分技术，大大缩短了计算时间。

(3) 间接考虑熔池内流体的流动、焊接参数和对潜热的不同的处理方法，对焊接温度场分布有着重要的影响。

(4) 文中条件下得到的数值模拟结果表明，利用双椭球形热源模型更接近实际焊接情况。

参考文献：

- [1] Tsai C L, Feng Z L. A computational analysis of thermal and mechanical conditions for weld metal solidification cracking [J]. Welding Research Abroad, 1996, 42(1): 34~41.
- [2] Karlsson R I. Three-dimensional finite element analysis of temperature and stresses in a single-pass butt-welded pipe [J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1990, 112(2): 76~84.
- [3] 武传松. 焊接热过程数值分析 [M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1990.
- [4] 张华, 潘际銮. 基于二维焊接温度场检测的三维温度场计算机模拟 [J]. 焊接学报, 1999, 20(4): 226~232.
- [5] 莫春立, 钱百年. 焊接热源计算模式的研究进展 [J]. 焊接学报, 2001, 22(3): 93~96.
- [6] Shi Qingyu, Lu Anli. Development and application of the adaptive mesh technique in the three-dimension numerical simulation of the welding process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 121(2): 167~172.
- [7] 魏艳红. 焊接凝固裂纹温度场的数值模拟 [J]. 焊接学报, 1999, 20(3): 199~204.
- [8] 李小龙. 不锈钢焊接凝固裂纹驱动力的数值模拟 [M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社, 2000.
- [9] 陈火红. Marc有限元实例分析教程 [M]. 北京：机械工业出版社, 2002.

作者简介：董志波，男，1975年出生，博士研究生。主要从事焊接凝固裂纹的数值模拟及预测。

Email： dongzhb@hit.edu.cn