

动速度。

式(1)的求解领域包括液态熔池和其周围固体。在整个求解领域内,这是个对流与传导问题。但是,由于在固体中流体的速度等于零,因而实际上在固体区域内所进行的是一个纯导热的计算^[5]。由此得到的解将提供在固体与流体的温度分布,它们在固液界面上自动吻合。

考虑的是非稳态状态。在焊接开始之前,工件为固态。燃弧后,工件吸收电弧热,此时工件吸收的热量大于向周围散发的热量,随着工件吸收的热量逐渐增加,温度逐渐升高,并出现熔池。随着焊接时间的延长,熔池不断扩大。当熔池达到一定的尺寸时,熔池吸收的电弧总热量等于通过熔合面传入母材的热量加上从熔池表面散失的热量,此时达到准稳态状态。这时的熔池具有恒定的形状,可以看作是随热源中心移动的恒定温度场,并以与电弧相同的速度沿 x 轴移动。

对于熔池中的流体流动应满足动量方程,其动量方程如下。

x 方向

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right), \quad (2)$$

y 方向

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right), \quad (3)$$

z 方向

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right), \quad (4)$$

式中: μ 为粘度系数。

此外,根据经典力学的质量守恒定律,系统的质量是不变的,流场还应满足一个附加条件,即连续性方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (5)$$

上述方程是描述运动电弧作用下瞬态熔池中的流场与热场的控制方程组。

1.2 边界条件

控制方程组的求解区域包括熔池及其周围金属。在整个求解区域内,固相区以固态热传导为主,熔池区则以高温液态金属的对流为主。作者所研究的焊接过程是非稳态的过程,所以在熔池表面存在

着电弧热以及由于焊接边界的对流和辐射而造成的热量损失。由于紫铜的热传导率高,在焊接时会有大量的热量迅速从加热区传导出,又由于在焊接速度的方向上熔池及温度场的对称性,计算时只考虑工件的一半。其工件表面的热边界条件为

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = q(r) - h(T - T_0), \quad (6)$$

式中: $q(r)$ 为电弧热流密度; h 为辐射和对流等效换热系数。

1.3 相变潜热

在 TIG 焊接过程中,熔池区域存在着熔化、凝固等相变过程。相变时会吸收或放出潜热,即相变潜热。在相变界面存在着温度梯度的不连续性,熔化时吸收潜热,凝固时释放潜热。处理相变的一种办法是采用热焓法即通过定义材料随温度变化的焓来考虑潜热。其关系式可表示为

$$\Delta H(T) = \int_0^T \rho c(t) dt, \quad (7)$$

式中: ρ 为材料密度; c 为比热容; t 为温度变量。

1.4 热源模式

通常采用高斯分布的函数就可以解决 TIG 焊接热流分布的问题。但是人们用二维导热方程计算热源分布时常常将纵向热流忽略,因此只有三维计算才能真正实现焊接热过程。作者采用 Goldak J^[6] 等人提出的双椭球热流密度分布模型,由于 TIG 焊熔深较浅,可以对双椭球模型进行简化,采用表面分布双椭圆模型,对于该模型,熔池前半部分的能量密度可表达为

$$q(x, y, t) = \frac{3f_r Q}{a_1 b \pi} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_1^2}\right) \exp\left(-\frac{3[z + v(\tau - t)]^2}{b^2}\right), \quad (8)$$

式中: f_r 为总的输入热功率在熔池前半部分的能量密度的分配指数; Q 为热输入率; a_1 为双椭圆模型熔池前半部分的长半轴; b_1 为双椭圆模型的短半轴; τ 为初始时刻电弧的滞后因子。

熔池后半部分的能量密度可表达为

$$q(x, y, t) = \frac{3f_r Q}{a_2 b \pi} \exp\left(-\frac{3x^2}{a_2^2}\right) \exp\left(-\frac{3[z + v(\tau - t)]^2}{b^2}\right), \quad (9)$$

式中: f_r 为总的输入功率在熔池后半部分的分配指数; a_2 为双椭圆模型熔池后半部分的长轴。

熔池前半部分的 a_1 、 b 与后半部分的 a_2 、 b 是独立的,可以取不同的值,如图 2 所示。图中的 ξ 是动坐标。

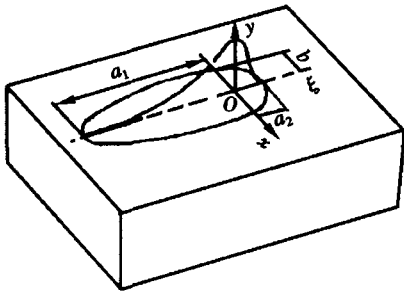


图 2 表面双椭圆热源分布模型

Fig.2 Surfaced bielliptic model of heat distribution

2 非均匀网格的生成及材料的热物理性能

利用所建立的三维模型对 TIG 焊接热过程进行分析计算,计算网格见图 3。由于焊接过程中,熔池区靠近热源附近的温度梯度大,变化速度特别快,离热源越远,温度梯度越小。采用均匀的网格解决不了计算精度与计算速度之间的矛盾,因而采用非均匀网格系统来解决这一问题,即在热源附近采用较密的网格,而在远离热源的部位将网格划分得稀疏些。在 x 、 y 方向采用扩张网格^[7],网扩张系数为 1.05,而在 z 方向则采用较细的均匀网格。

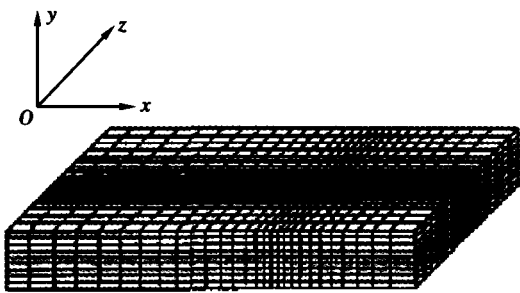


图 3 非均匀网格系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of non-uniform grid system

试验所用的材料是 10 mm 厚的 T3 紫铜板。T3 紫铜热物理性能见表 1。

3 计算结果和试验验证

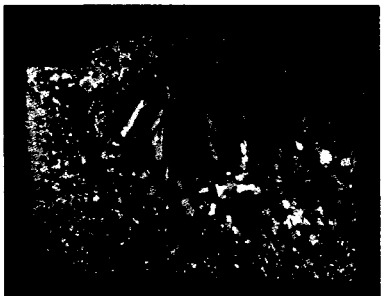
由于焊接过程中强烈的弧光干扰及熔池内液态金属的剧烈运动,使得熔池温度场的试验检测十分困难,因此可以通过比较焊接熔宽与熔深的计算值和试验值来验证模型的正确性。因为在相同的电流和弧长下,氮弧的功率为氩弧的 3 倍,在氩气中混合

表 1 紫铜(T3)的热物理性能

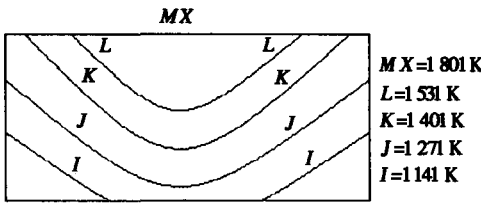
Table 1 Thermophysical properties of T3 red copper

物理量	取值
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	8.94
熔点 $T_{\text{熔}}/^\circ\text{C}$	1 083
导热系数 $\kappa/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K})$	391
比热容 $c/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot^\circ\text{C})$	0.384
线膨胀系数 $\alpha_l/(10^{-6}\text{K}^{-1})$	16.8
线收缩率 $\eta(\%)$	2.1
表面张力 $\sigma/(10^{-5}\text{N}\cdot\text{cm}^{-1})$	1 300
环境温度 T_0/K	300

一定比例的氮气能显著提高电弧热效应,所以试验在不预热情况下采用氩氮混合保护 TIG 焊接。所采用的焊接工艺参数为焊接电流 380 A,焊接速度 400 mm/min,氩气流量 20 L/min,氮气流量 8 L/min,钨极直径为 5 mm。图 4a 为在上述焊接工艺参数下的焊接熔池横截面图,图 4b 为其对应的温度分布。



(a) 工件的横截面图



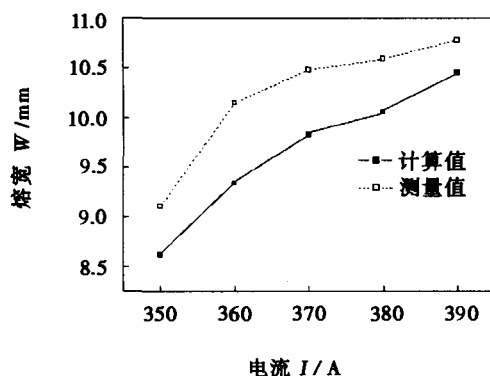
(b) 横截面的温度分布

图 4 TIG 焊时工件的横截面图及其温度分布

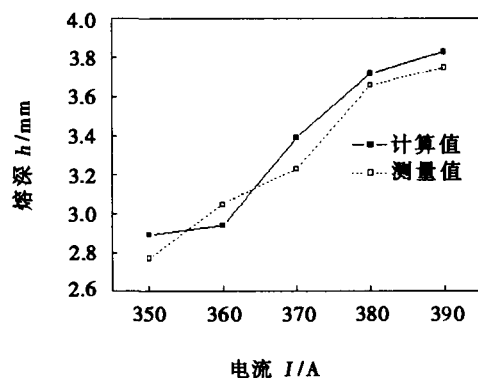
Fig.4 Cross section and corresponding temperature distribution of workpiece for TIG

3.1 焊接电流对温度场的影响

焊接电流的变化影响着焊接的热输入。从图 5 可以看出,随着焊接电流的增大,熔宽和熔深都相应增大。这是由于焊接电流增大,焊接热输入相应增加,电弧加热的工件上各点的热输入增加,导致工件上的温度整体升高,温度分布范围相应变大。



(a) 不同电流下熔宽的变化



(b) 不同电流下熔深的变化

图 5 焊接电流对焊接热输入的影响

Fig.5 Effect of current on heat input

3.2 焊接速度对温度场的影响

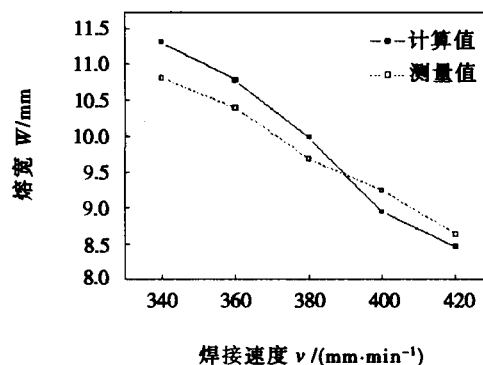
焊接速度的变化同样也影响着焊接熔池的形状。由图 6 可以看出,随着焊接速度的增加,熔宽和熔深均减小。这是由于在单位时间的热输入不变的情况下,焊接速度的增大使得电弧与试件每一部分的作用时间变短,工件每点的焊接热输入量减少,从而导致熔池的熔宽和熔深变小。

4 结 论

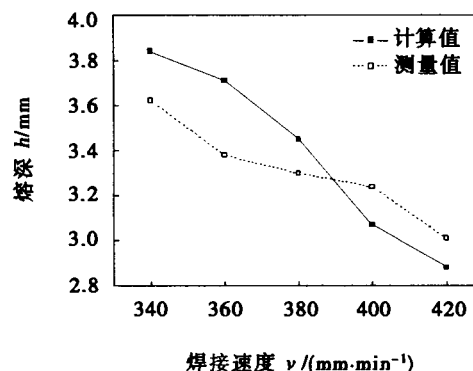
(1) 根据能量守恒的基本原理和 TIG 焊接工艺的特点,建立了运动电弧作用下紫铜的非稳态 TIG 焊接熔池形态的数值分析模型。该模型综合考虑了熔池的蒸发散热、紫铜的散热系数和工件表面的对流散热等符合 TIG 焊接过程的实际情况。

(2) 在氩气中混合一定比例的氮气,显著提高了电弧热效应,顺利实现了对紫铜的不预热 TIG 焊接。试验结果证明,紫铜的不预热焊接是可行的。

(3) 对不同工艺参数条件下 TIG 焊接温度场进行了计算,建立了不同的工艺参数与熔宽和熔深之



(a) 不同焊接速度下熔宽的变化



(b) 不同焊接速度下熔深的变化

图 6 焊接速度对焊接热输入的影响

Fig.6 Effect of velocity on heat input

间的关系。结果表明,计算值与测量值符合较好,说明所建立的模型是正确和合理的。

参考文献:

- [1] 李 强, 钱百年, 李殿中. 焊接熔池的传热与流体流动模拟进展[J]. 焊接学报, 2002, 23(4): 91-96.
- [2] 吴高言, 李午申, 邹宏军, 等. 焊接数值模拟技术发展现状[J]. 焊接学报, 2002, 23(3): 89-92.
- [3] Kim S D, Na S J. Effect of weld pool deformation on weld penetration in stationary gas tungsten arc welding [J]. Welding Journal, 1992, 71(B): 179-193.
- [4] Lin M L, Eagar T W. Influence of arc pressure on weld pool geometry[J]. Welding Journal, 1985, 64(6): 163-193.
- [5] Ko S H, Choi S H, Yoo C D. Effect of surface depression on pool convection and geometry in stationary GTAW[J]. Welding Journal, 2001, 80(2): 39-45.
- [6] Goldak J. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metal. Trans. B, 1984, 15B(6): 299-305.
- [7] 克罗夫特 D R. 传热的有限差分方程计算[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982. 182-193.

作者简介: 雷玉成,男,1962年11月出生,工学硕士,教授。主要从事焊接工艺及设备、焊接过程控制及模拟、先进连接技术等方面的研究与开发工作,发表论文50余篇。

Email: yclei@uj.s.edu.cn