

# 钨极氩弧焊熔透熔池塌陷倾向的预测\*

赵 明 武传松 陈 姬

(山东大学材料连接技术研究所 济南 250061)

**摘要:** 对钨极氩弧焊(GTAW)全熔透熔池进行受力分析, 建立熔透熔池的力学模型, 提出熔池塌陷的力学判据。利用所建立模型计算并讨论影响熔池塌陷的各个作用力的动态变化、大小和百分比组成, 并预测钨极氩弧焊接不锈钢和低碳钢薄板时在不同焊接速度下的合适焊接电流范围。试验结果与理论预测相一致, 验证了所建立模型的实用性。

**关键词:** 焊接熔池 熔透 变形 塌陷 力学模型

**中图分类号:** TG444

## 0 前言

已有的数值计算模型<sup>[1-2]</sup>, 对任意给定的焊接工艺参数是否会导致工件熔合不良, 或熔透过大, 或熔池塌陷, 其本身没有给出直接的分析或判断。当采用这样的模型来计算熔池热场和流场时, 如果给定的焊接工艺参数过大, 由于模型本身对熔池塌陷与否不能进行分析或判断, 故仍可能给出有关热场和流场的计算数据, 而事实上这些数据没有实际意义; 因为实际的焊接过程可能由于熔池塌陷, 工件被焊穿, 焊接过程无法继续进行。由此可见, 在建立焊接热过程的数值分析模型时, 对熔池塌陷与否进行直接的预测与判断, 具有重要的理论意义和工程实用价值。

通过对钨极氩弧焊(Gas tungsten arc welding, GTAW)熔池进行全面的受力分析, 建立熔透熔池的力学模型, 从理论上给出熔池塌陷与否的力学判据; 计算并讨论作用在熔池区域的有关下塌力和支撑力; 预测 GTAW 焊接不同材质和板厚工件时的合适工艺参数范围; 通过工艺试验来验证所建立模型的正确性和可靠性。

## 1 模型

### 1.1 熔透熔池受力分析

图 1 是 GTAW 熔透熔池受力示意图。作用在熔池区域并对熔池塌陷有直接影响的力主要有: 电弧力、表面张力、固体曲面壁对熔池的支撑力、重力、剪切力。

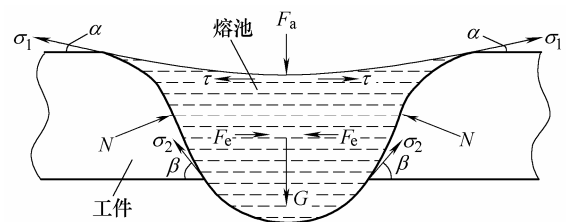


图 1 熔透熔池受力分析

#### 1.1.1 电弧力

运动电弧作用下的 GTAW, 钨极与工件之间存在一定的倾斜角, 电弧压力的分布关于钨极不是中心对称, 而是沿着焊接方向前轻后重。文中采用电弧压力双椭圆分布模式, 其数学表达式如下。

当 \$(x-u\_0t) \ge 0\$ 时

$$p_a(x,y) = C \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 \sigma_j^2} \exp\left(-\frac{3(x-u_0t)^2}{b_1^2}\right) \exp\left(-\frac{3y^2}{a^2}\right) \quad (1a)$$

当 \$(x-u\_0t) < 0\$ 时

$$p_a(x,y) = C \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 \sigma_j^2} \exp\left(-\frac{3(x-u_0t)^2}{b_2^2}\right) \exp\left(-\frac{3y^2}{a^2}\right) \quad (1b)$$

式中 \$\mu\_0\$ ——磁导率

\$I\$ ——焊接电流

\$\sigma\_j\$ ——电流密度分布参数

\$u\_0\$ ——焊接速度

\$a, b\_1, b\_2\$ ——与焊接工艺参数有关的热源模型参数

\$C\$ ——电弧压力修正系数, 与焊接电流、弧长、钨极直径和锥角、保护气体成分和流量有关<sup>[3-4]</sup>

那么, 作用在整个熔池区域的电弧力为

$$F_a = \iint_{\Omega_t} p_a(x,y) dx dy \quad (2)$$

式中 \$\Omega\_t\$ ——熔池自由上表面所围成的区域

\* 教育部科学技术研究重点资助项目(104109)。20060822 收到初稿, 20070123 收到修改稿

1.1.2 表面张力

对熔池塌陷产生直接影响的是表面张力的垂直分量。上、下表面张力的垂直分量分别为

$$F_{\sigma_1} = \int_{l_1} \sigma_1 \sin \alpha dl_1 \quad (3a)$$

$$F_{\sigma_2} = \int_{l_2} \sigma_2 \sin \beta dl_2 \quad (3b)$$

式中  $\sigma_1, \sigma_2$ ——熔池上、下表面张力  
 $\alpha, \beta$ ——上、下表面张力与水平面夹角  
 $l_1, l_2$ ——上、下表面熔池周长

1.1.3 固体曲面壁对熔池的支撑力

讨论熔池塌陷问题时，只需考虑垂直方向上固体曲面壁对熔池的支撑力，为<sup>[5]</sup>

$$N_z = \rho g \int_{A_z} h dA_z = \rho g V_p \quad (4)$$

式中  $\rho$ ——密度  
 $g$ ——重力加速度  
 $\int_{A_z} h dA_z$ ——沿熔池下表面熔合线向上引无数条垂直母线到熔池上表面与熔合面所包围的液体体积(这样的体积称为压力体<sup>[5]</sup>)

1.1.4 重力

重力的作用点位于熔池的重心，方向垂直向下，可表示为

$$G = \rho g V = \iiint_V \rho g dx dy dz \quad (5)$$

式中  $V$ ——熔池体积

1.1.5 剪切力

剪切力是由于等离子体的流动而产生的，存在于熔池上表面，沿着径向分布，一般情况下为几十 Pa<sup>[6]</sup>；由于上表面变形量很小，因而剪切力的纵向分量就更小。文中忽略剪切力对熔池塌陷的影响。

需要说明的是：电磁力和浮力是熔池的内力，是熔池内流体流动的驱动力，对熔池的塌陷没有直接影响。

1.2 力学判据

根据前面的分析，可推出熔池不塌陷的力学判据为

$$F_{\sigma_1} + F_{\sigma_2} + N_z \geq G + F_a \quad (6a)$$

可具体表示为

$$\int_{l_1} \sigma_1 \sin \alpha dl_1 + \int_{l_2} \sigma_2 \sin \beta dl_2 + \rho g \int_{A_z} h dA_z \geq \iiint_V \rho g dx dy dz + \iint_{\Omega_1} p_a(x, y) dx dy \quad (6b)$$

式(6)左边的力有利于熔池的稳定存在，称为支撑力；式(6)右边的力不利于熔池的稳定存在，相反对熔池的塌陷起推动作用，称为下塌力。上式的物理意义为：如果作用于熔透熔池的支撑力不小于下塌力，熔池就可以稳定存在；否则，熔池塌陷，工

件被焊穿。

2 数值方法

利用 Visual Fortran 编程，采用结构化的设计思想，这样有利于整个程序的调试、编译和连编。主程序中涉及到的结构块有：常变量模块、热物性参数、热源模型、坐标系变换、网格划分、熔池形状、温度场、流场、表面变形、焊穿判断和结果输出；有的做成子程序供主程序或其他子程序调用(采用 call 调用)，有的则做成模块(采用 use 调用)。

焊穿判断子程序置于表面变形子程序之后，在工件熔透后开始执行。如果总支撑力大于总下塌力，则运算继续；如果总支撑力小于总下塌力，则运算停止，并给出熔池塌陷的信息。在焊穿判断子程序中，上、下表面张力垂直分量的求解是整个熔池受力分析的关键，下面给出的算法设计供大家参考。

(1) 表面张力是温度和材料组分的函数，选取的计算公式为<sup>[7]</sup>

$$\gamma(T) = \gamma_m - A_\gamma(T - T_m) - R_g T \Gamma_s \times \ln \left( 1 + k_1 \alpha_s \exp \left( \frac{-\Delta H_0}{R_g T} \right) \right) \quad (7)$$

式中  $\gamma$ ——表面张力  
 $\gamma_m$ ——纯金属在熔点时的表面张力  
 $A_\gamma$ ——表面张力常数  
 $T$ ——温度  
 $T_m$ ——熔点  
 $R_g$ ——气体平衡常数  
 $\Gamma_s$ ——表面过饱和参数  
 $k_1$ ——偏析熵因子  
 $\alpha_s$ ——合金中表面活性元素的活度  
 $\Delta H_0$ ——偏析焓

(2) 不同时刻不同位置处的  $\sin \alpha$  和  $\sin \beta$  是不同的，借用熔池形状特征参数来求解的方法，可表示为

$$\sin \alpha = \frac{D_t}{\sqrt{D_t^2 + [(b_t + L_t)/3]^2}} \quad (8a)$$

$$\sin \beta = \frac{D_b}{\sqrt{D_b^2 + [(b_b + L_b)/3]^2}} \quad (8b)$$

式中  $D_t, D_b$ ——熔池上、下表面的最大下塌深度  
 $b_t, b_b$ ——熔池上、下表面的半宽  
 $L_t, L_b$ ——熔池上、下表面的长度

(3) 由于熔池的周线不是规则的几何形状，因而不能借助弧微分的方式来计算其长度。下面采用逐行扫描的方法来求解，有

$$l_1 = 2.0 \times \sum_{i=F_1}^{F_2} \sqrt{d_i^2 + [(F(i+1) - F(i)) \times d_j]^2} \quad (9a)$$

$$l_2 = 2.0 \times \sum_{i=B_1}^{B_2} \sqrt{d_j^2 + [(B(i+1) - B(i)) \times d_j]^2} \quad (9b)$$

式中  $d_i, d_j$  ——  $x, y$  方向的网格间距

$F_1, F_2$  —— 上表面熔池长度的网格位置

$B_1, B_2$  —— 下表面熔池长度的网格位置

$F(i), B(i)$  —— 上、下表面不同  $i$  值所对应的网格宽

### 3 算例

对于给定的焊接工艺参数(0Cr18Ni9, 3 mm, 110 A, 15 V, 120 mm/min), 起弧后工件在 3.7 s 时全熔透; 随着时间的延长, 熔池体积逐渐扩大, 在 6.5 s 左右焊接过程达到宏观准稳态。

从熔透到准稳态这一过程中熔池中各支撑力和下塌力的动态变化, 如图 2 所示。熔池上、下表面张力不断增加, 但熔池上表面张力的垂直分量  $F_{\sigma_1}$  增加较小, 而熔池下表面张力的垂直分量  $F_{\sigma_2}$  增加较大, 主要是由于熔池从熔透到准稳态的过程中, 下表面变形量的变化率远大于上表面变形量的变化率。工件全熔透后熔池上表面的几何形状基本不发生太大的变化, 因而电弧力随时间的变化很微小。熔池重力稳定增加, 这与焊接工艺过程对工件施加连续稳定的热源相一致。固体曲面壁对熔池的支撑力与其他四个力的变化趋势相反——随着熔透熔池的长大, 固体曲面壁对熔池的支撑力反而减小, 这是因为随着熔透程度的增加, 固体曲面壁的陡度增加, 对熔池的支撑作用反而减弱。

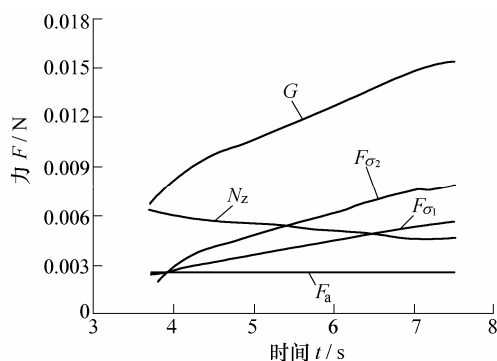


图 2 熔透熔池各作用力的动态变化

熔透熔池所受总支撑力和总下塌力的动态变化如图 3 所示。在熔池从熔透到准稳态的过程中, 总支撑力和总下塌力随着熔池的长大都不断增加, 但总支撑力始终大于总下塌力, 这样不仅有利于熔池的长大, 同时还可以充分保证熔透熔池的稳定

存在。

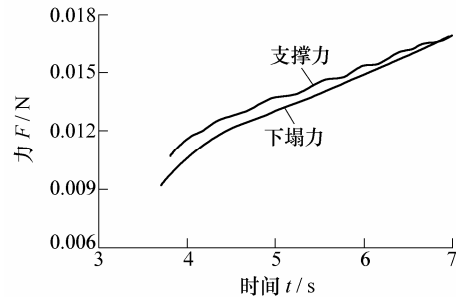


图 3 总支撑力和总下塌力的动态变化

饼形图 4 是稳定熔透熔池中各支撑力和下塌力的百分比组成。在支撑力体系中, 如图 4a 所示, 上表面张力垂直分量所占比例为 29.2%, 下表面张力垂直分量所占比例为 41.2%, 固体曲面壁对熔池的支撑力所占比例为 29.6%。在下塌力体系中, 如图 4b 所示, 电弧力为 16.0%, 熔池重力为 84.0%。在图 4c 中, 总支撑力为 50.3%, 总下塌力为 49.7%; 考虑到数值计算中存在误差, 可以认为总支撑力和总下塌力达到了动态平衡。

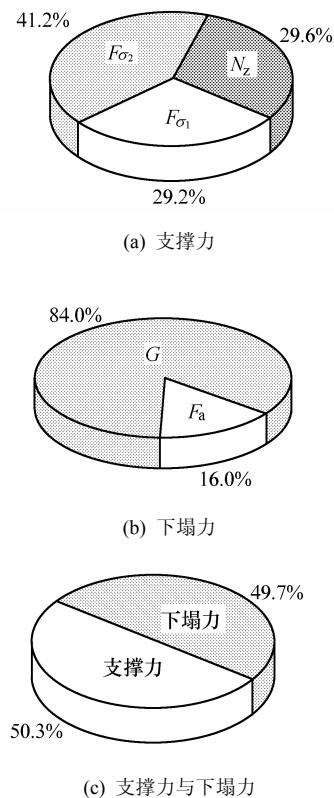


图 4 准稳态时熔池所受各力的百分比组成

对于给定的材质和板厚, 如果稍微增大焊接电流, 则电弧力和熔池的重力增加, 总下塌力增加; 熔池自由表面的变形量, 特别是下表面的变形量增加, 总支撑力也增加, 熔池仍然能够稳定存在。然而, 当进一步增大焊接电流时, 电弧力将急剧增大

(从式(1)和式(2)可知,  $F_a \propto \dot{V}$ ), 熔池重力增大, 而固体曲面壁对熔池的支撑力反而减小, 这时仅靠增大熔池自由表面的变形不能完全抵消增大的熔池下塌力, 熔池塌陷, 工件被焊穿, 焊接过程终止。

表1是对不锈钢试件(SS304, 200 mm×50 mm×3 mm)在不同焊接速度下所适用的焊接电流进行的预测。表2是对低碳钢试件(Q235, 200 mm×50 mm×2 mm)在不同焊接速度下所适用的焊接电流进行的预测。图5中弥散分布的点是试验结果。可以看出, 理论预测与试验结果是一致的。利用本文所建立的熔透熔池力学模型能够比较全面地反映熔池的动态变化情况, 具有良好的实用性。

表1 不锈钢试件熔透情况的预测

焊接速度 $u_0/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	焊接电流 $I/A$								
	80	90	100	110	120	130	140	150	160
1.5	P	P	P	P	P	P	B	B	B
2.0	N	P	P	P	P	P	P	P	B
2.5	N	N	P	P	P	P	P	P	P

表2 低碳钢试件熔透情况的预测

焊接速度 $u_0/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	焊接电流 $I/A$								
	60	70	80	90	100	110	120	130	140
1.5	N	P	P	P	P	P	B	B	B
2.0	N	N	P	P	P	P	P	B	B
2.5	N	N	N	P	P	P	P	P	B

注: N—未熔透 P—熔透 B—焊穿

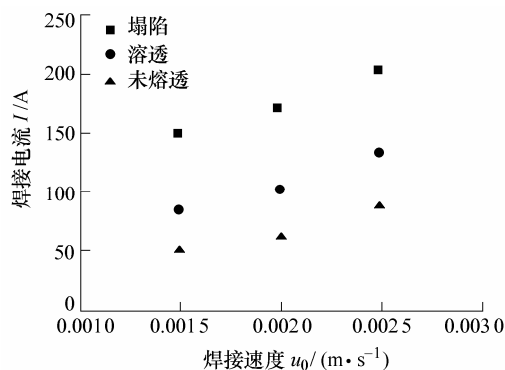


图5 不锈钢试验结果

## 4 结论

(1) 对 GTAW 熔池进行了全面的受力分析, 建立了熔透熔池的力学模型, 并给出了熔池塌陷的力学判据——如果总支撑力不小于总下塌力, 则熔池就可以稳定存在, 否则熔池塌陷。

(2) 利用所建立模型计算并分析了稳定存在的熔透熔池中影响熔池塌陷的各作用力的动态变化, 并分析了力的大小和组成比例。

(3) 利用所建立模型对不锈钢和低碳钢薄板在

不同焊接速度下的合适焊接电流范围进行了预测。试验结果与理论预测相一致, 说明了所建立模型具有良好的实用性。

## 参 考 文 献

- [1] 曹振宁. TIG/MIG 焊接熔透熔池流场与热场的数值分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1993.
- [2] FAN H G, TSAI H L, NA S J. Heat transfer and fluid flow in a partially or fully penetrated weld pool in gas tungsten arc welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 42(2): 417-428.
- [3] LIN M L, EAGAR T W. Influence of arc pressure on weld pool geometry[J]. Welding Journal, 1985, 64(6): 163-s-169-s.
- [4] YAMAMOTO T, OHJI T, MIYADAKA F, et al. Simulation model for MAG arc welding as an engineering tool[EB]. Materials Science Forum, 2003, 426-432: 4 057-4 062.
- [5] 归柯庭, 汪军, 王秋颖. 工程流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [6] MCKELLIGENT J, SZEKELY J. Heat transfer and fluid flow in the welding arc[J]. Metallurgical Transaction A, 1986, 17(7): 1 139-1 148.
- [7] SAHOO P, DEBROY T, MCNALLAN M J. Surface tension on binary metal surface active solute systems under conduction relevant to welding metallurgy[J]. Metallurgical Transaction B, 1988(6), 19: 483-491.

## PREDICTING OF THE COLLAPSING FOR COMPLETELY PENETRATED GTA WELD POOL

ZHAO Ming WU Chuansong CHEN Ji  
(Institute for Materials Joining,  
Shandong University, Jinan 250061)

**Abstract:** The forces acting on a gas tungsten arc (GTA) weld pool are analyzed. A mechanics-model of the completely penetrated weld pool is developed and its collapsing criteria are given out. The transient variations of all the forces, which affect the weld pool collapsing, are computed and discussed. Under the condition of different welding velocities, the suitable values of welding current are predicted for GTA welding stainless steel and mild steel sheets. The calculated results are in agreement with the experimental ones, which verifies the practicability of this model.

**Key words:** Weld pool Penetration Deformation Collapsing Mechanics model

作者简介: 赵明, 女, 1973 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: meg10512001@yahoo.com.cn