

* 国家教委留学回国人员科研基金资助项目。

条曲线上分别以 $O_1、O_2$ 为原点按高斯函数分布:

$$q_1(s)=q_{1m}\exp\left\{-\frac{s^2}{2\sigma_{q1}^2}\right\}$$
$$q_2(s)=q_{2m}\exp\left\{-\frac{s^2}{2\sigma_{q2}^2}\right\}$$

$O_1\text{ 点}$ $O_2\text{ 点}$

$q_{1m}、q_{2m}$ 为 $O_1、O_2$ 点的最大比热流, $\sigma_{q1}、\sigma_{q2}$ 为热源分布参数, s 为从原点 O_1 或 O_2 开始的曲线弧长。

因焊丝端部 W 至熔池表面的距离 L 越大, 其 q_m 越小, σ_q 越大, 假定:

$$q_{1m}L_1=q_{2m}L_2$$
$$L_2/\sigma_{q2}=L_1/\sigma_{q1}$$
$$r_1+r_2=2\sqrt{6}\sigma_q$$

(1)

$$L_2/\sigma_{q2}=L_1/\sigma_{q1}$$

(2)

$$r_1+r_2=2\sqrt{6}\sigma_q$$

(3)

式中 σ_q 根据试验和计算结果确定, 其它各符号的意义见图 1。

求解熔池的表面变形方程得到熔池表面的形状函数 $\Phi(x,y)$, 根据熔池表面上点的坐标和焊丝端部点 W 的坐标 (O,O,z_0) , 可确定 $O_1、O_2$ 点, 同样也可确定出 $x=0$ 截面所得熔池上表面曲线上的 $O_3、O_4$ 点, 即

$$O_1(x_1,O,H-\Phi(x_1,O)),O_2(x_2,O,H-\Phi(x_2,0))$$
$$O_3(O,-y_1,H-\Phi(O,-y_1)),O_4(O,y_1,H-\Phi(O,y_2))$$

熔池表面凹陷的最低点 O 为: $(O,O,H-\Phi(0,0))$, 其中 H 为试件厚度。

根据图 1 的几何关系式(3)可近似写为:

$$\frac{2\sqrt{6}x_1\sigma_{q1}}{\sqrt{x_1^2+[\Phi(x_1,0)-\Phi(0,0)]^2}}+\frac{2\sqrt{6}|x_2|\sigma_{q2}}{\sqrt{x_2^2+[\Phi(x_2,0)-\Phi(0,0)]^2}}=2\sqrt{6}\sigma_q$$

(4)

式(2)、式(4)联立, 可求出 $\sigma_{q1}、\sigma_{q2}$ 。

如图 2 所示, 当 $O_1、O_2、O_3、O_4$ 点不在一个水平面上时, 取 4 点 z 坐标的平均值 z^* 作为热流密度分布原点的 z 坐标值, 即:

$$z^*=H-\frac{\Phi(x_1,0)+\Phi(x_2,0)+\Phi(0,y_1)+\Phi(0,-y_1)}{4}$$

热流密度的分布与焊丝端部 W 到熔池表面的距离 L 有关, 非 $y=0$ 截面所确定的熔池表面曲线上 q_m 及 σ_q 由 $q_{1m}、q_{2m}、\sigma_{q1}、\sigma_{q2}$ 线性插值求出, 根据图 2 的几何关系可得出:

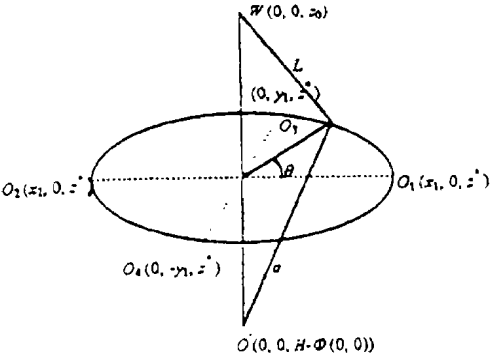


图 2 热流分布原点之间的几何关系
Fig. 2 Geometric relation among some origin points about heat flux distribution

$$q_m(\theta)=q_{2m}+\frac{q_{1m}-q_{2m}}{L_1-L_2}(\sqrt{x_1^2\cos^2\theta+y_1^2\sin^2\theta+(z_0-z^*)^2}-L_2)$$

(5)

$$\sigma_q(\theta)=\sigma_{q1}+\frac{\sigma_{q2}-\sigma_{q1}}{L_2-L_1}(\sqrt{x_1^2\cos^2\theta+y_1^2\sin^2\theta+(z_0-z^*)^2}-L_1)$$

(6)

$$a(\theta)=\sqrt{x_1^2\cos^2\theta+y_1^2\sin^2\theta+(z^*-H+\Phi(0,0))^2}$$
 (7)

当 $\theta=90^\circ\sim180^\circ$

$$q_m(\theta)=q_{2m}+\frac{q_{1m}-q_{2m}}{L_1-L_2}(\sqrt{x_2^2\cos^2\theta+y_1^2\sin^2\theta+(z_0-z^*)^2}-L_2)$$
 (8)

$$\sigma_q(\theta)=\sigma_{q1}+\frac{\sigma_{q2}-\sigma_{q1}}{L_2-L_1}(\sqrt{x_2^2\cos^2\theta+y_1^2\sin^2\theta+(z_0-z^*)^2}-L_1)$$
 (9)

$$a(\theta)=\sqrt{x_2^2\cos^2\theta+y_1^2\sin^2\theta+(z^*-H+\Phi(0,0))^2}$$
 (10)

将热流密度在其作用区域上积分有:

$$\int_0^\pi\int_{-\infty}^\infty q_m(\theta)\exp\left[-\frac{s^2}{2\sigma_q^2(\theta)}\right](s+a(\theta))dsd\theta=\frac{\eta IV}{2}, \text{ 根}$$
 (11)

式中, η 为电弧热效率, 将式(5)~式(10)代入式(11), 并同式(1)联立得到一个关于 q_{1m} 、 q_{2m} 的二元一次方程组, 可求出 q_{1m} 、 q_{2m} 。已知 q_{1m} 和 q_{2m} , 根据式(5)~式(11)可以求出任一 θ 角的 $q_m(\theta)$ 、 $\sigma_q(\theta)$, 这样就确定了热流密度的分布:

$$q(\theta,s)=q_m(\theta)\exp\left[-\frac{s^2}{2\sigma_q^2(\theta)}\right]), \quad H$$
 (12)

2 计算结果与讨论

采用有限差分技术求解熔池表面变形方程及能量方程^[3]。选用尺寸为 150mm×80mm×6mm 低碳钢作为焊接试件, 计算参数的取值见文献[3]。数值分析中, 通过提高液体区的导热系数 k (取 120W/m²·°C) 来近似反映熔池内液体金属的对流传热。换热系数 α 由下式给出^[4]:

$$\alpha=24.1\times10^{-4}\cdot\epsilon\cdot T^{1.61} \quad (\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C})$$

焊接电流对熔池形状的影响示于图 3。可见, 焊接电流由 240A 增至 260A 时, 由于热输入的增加和焊丝熔化速度的加快, 熔池体积、焊缝余高明显增加, 熔池的凹陷增加, 表面变形更加严重。

图 4(a) 表示热流在不同纵截面上的分布, 相对应的熔池表面形状见图 3, 可见在纵向截面上 ($y=0$), 热流密度呈双峰分布, 这个双峰分布对于 y 轴是不对称的, 而偏向 x 轴的负方向, x 轴上两个峰值分别位于 $x=-5\text{mm}$ 和 $x=2.5\text{mm}$ 处, 这是因为电弧中心线后面的熔池表面变形较大。随着纵截面位置远离焊缝中心线 (y 坐标值

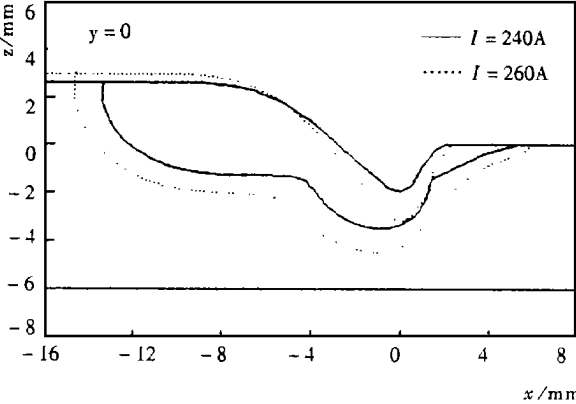


图 3 焊接电流对焊接熔池几何形状的影响 ($y=0$ 纵截面) ($V=25\text{V}$, $u_0=430\text{mm/min}$, $d=1.2\text{mm}$, $W_e=16\text{mm}$)
Fig. 3 Influence of welding current on weld pool geometry (longitudinal section)

增大), 双峰分布逐渐消失, 当 y 的坐标值等于或大于 2.0mm 时, 就变为单峰分布。如图 3 所示, 在电弧中心线附近, 熔池表面凹陷, 焊丝端部到熔池表面的距离较大, 而离电弧中心线较远的点, 这个距离较小。因此, 熔池表面凹陷中心流过的电流较少, 而更多的电流从离开电弧中心线一定距离的熔池表面流过。图 4(b) 为热流密度在电弧空间分布的三维图。表 1 则为不同截面位置 (θ 不同) 的 q_m 、 σ_q , 随截面位置的变化。熔池的表面变形情况不同, 决定该部位热流分布的特征参数 q_m 、 σ_q 亦发生了相应变化。

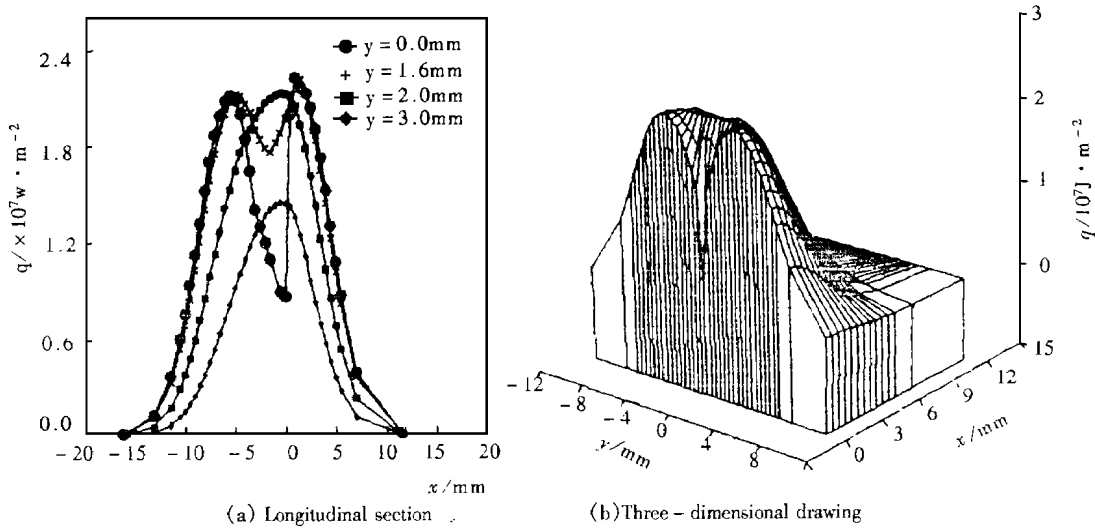


图 4 电弧热流分布的计算结果

Fig. 4 Predicted distribution of arc heat flux
($I=240\text{A}$, $V=25\text{V}$, $u_0=430\text{mm/min}$, $d=1.2\text{mm}$, $W_e=16\text{mm}$)

表 1 焊件不同部位热流分布的特征参数 q_m 、 σ_q

Table 1 The distribution parameters at different positions of the weldpool surface

$\theta/(\text{degree})$	0	30	60	90	120	150	180
$\sigma_q/10^3\text{m}$	2.9797	2.9952	3.0270	3.0426	3.0818	3.1566	3.1948
$q_m/10^7\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	2.2676	2.2566	2.2340	2.2229	2.1955	2.1420	2.1149

图 5 为焊接电流对热流分布的影响 ($y=0$ 纵向截面), 相应的熔池表面形状见图 3。采用较大电流焊接时, 焊接热输入, 焊丝熔化速度以及熔滴冲击力、电弧压力均增大, 使熔池的体积变大, 熔池表面的凹凸变形严重, 从而导致热流密度双峰分布更加明显, 焊接电流为 240A 时, 最大热流密度为最小值 (位于熔池表面最大凹陷外) 的 2.5 倍左右, 而 260A 时, 增至 5 倍左右。

为了验证本文提出的电弧热流分布模型的可靠性, 进行了焊接工艺试验, 试件材料、尺寸与数值分析中所采用的相同。图 6 表示试验结果与计算结果的比较, 图中同时给出了采用高斯热源模型的计算结果, 表 2 为焊缝几何形状的有关参数。可以看出, 由于高斯热源比较集中的作用于以 0 为原点的区域内, 所以计算出的焊缝宽度、余高、熔深与实测值存在较大的偏差, 采用本文热流分布模型的计算结果与实测结果吻合良好, 因此, 采用本文提出的电弧热流分布模型的计算结果更符合实际。

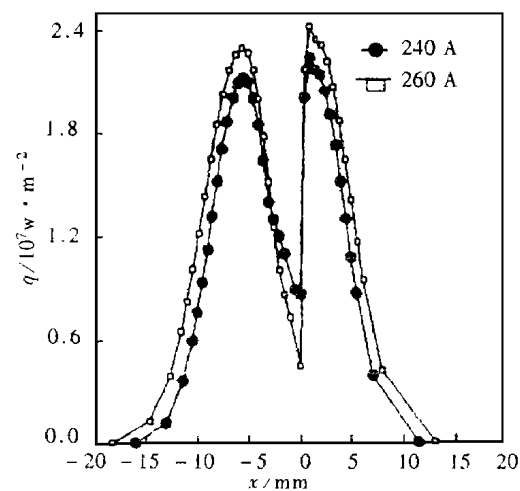


图 5 焊接电流对热流分布的影响

Fig. 5 Effect of welding current on heat flux distribution

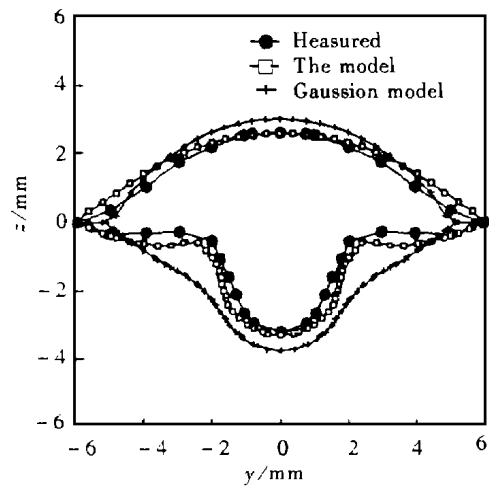


图 6 计算结果和实测结果的比较

Fig. 6 Comparison of predicted and measured results
($I=240\text{ A}$, $V=25\text{ V}$, $u_0=430\text{ mm/min}$, $d=1.2\text{ mm}$
 $W_e=16\text{ mm}$ shielding gas: $\text{Ar}+2\%\text{ CO}_2$)

表 2 焊缝几何尺寸的计算和实测结果

Table 2 The predicted and measured GMA weld dimensions

	Weld width/mm	Reinforcement height/mm	Penetration/mm
Measurements	11.82	2.60	3.20
The model	11.56	2.59	3.29
Gaussian model	10.40	3.01	3.74

3 结 论

- (1)本文根据电弧作用的物理过程, 提出了 GMAW 熔池表面产生较大变形时的电弧热流分布模型, 电弧热流的分布在电弧中心线附近呈双峰分布, 且双峰向电弧后方偏移, 在离开电弧中心线一定距离处变为单峰分布。
- (2)计算结果表明, 焊接电流、焊接熔池的几何形状、电弧热流分布三者相互影响, 增大焊接电流, 焊接熔池的表面变形加剧, 电弧热流分布随之改变。
- (3)焊接工艺试验结果表明, 与高斯热源模型相比, 利用本文所给出的电弧热流分布模式计算焊接熔池的形状及温度场更符合实际。

(1997—06—25 收到初稿, 1998—07—20 收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 武传松, 曹振宁, 吴林. 熔透情况下三维 TIG 焊接熔池流场与热场的数值分析. 金属学报, 1992, 28(10); B532 ~ 542
- 2 J-W. Kim and S-J. Na. A study on the effect of contact tube to workpiece distance on weld pool shape in gas metal arc welding. Welding journal, 1995, 74(5); 141s ~ 152s
- 3 武传松, L. Dorn. 熔滴冲击力对 MIG 焊接熔池表面变形的影响. 金属学报, 1997, 33(7); 774 ~ 780
- 4 M. C. Tsai et al. Electromagnetic force induced convection in weld pools with a free surface. Welding Journal, 1990, 69(6); 241s ~ 246s
- 5 安藤弘平等. 焊接电弧现象(增补版). 北京: 机械工业出版社, 1985. 10; 93 ~ 95

Influence of Arc Heat flux Distribution on Temperature Profiles in GMAW

Sun Junsheng, Wu Chuansong

(Shandong University of Technology, Jinan)

Abstract A heat flux distribution model of arc which suits for large surface deformation of GMAW weld pool is given in this paper. Based on this model and the consideration of droplet transfer process and the weld reinforcement, a numerical analysis model of welding heat flow field and a calculating program are developed. By numerical simulation, the interactions of welding process parameters, GMAW weld pool surface deformation, arc heat flux distribution, weld pool geometry and temperature profiles are quantitatively analyzed. The experiment results show that compared with the Gaussian model of arc heat flux, the heat flux distribution model of GMAW arc given in this paper accords with practical situation much better.

Key words arc heat flux, distribution model, GMAW temperature field

作者简介 孙俊生, 男, 1963 年出生, 博士、副教授, 从事焊接材料、焊接热过程数值模拟的研究工作, 先后发表研究论文 20 余篇。