

熔池表面形状对电弧电流密度分布的影响*

孙俊生 武传松

(山东大学材料学院, 济南 250061)

(2000 年 3 月 10 日收到, 2000 年 4 月 30 日收到修改稿)

电弧电流密度分布决定着电弧热流密度、电弧压力的分布, 是了解焊接电弧物理本质, 建立焊接过程数学模型的基础. 根据电弧物理的基本原理, 建立了电弧电流密度在变形熔池表面上的分布模型, 定量分析了熔池表面形状对电流密度分布的影响规律. 计算表明, 电流密度在电弧中心线附近呈双峰分布, 在离开电弧中心线一定距离处变为单峰分布, 熔池表面形状对电流密度分布有明显的影响. 基于该模型计算的焊缝几何形状与实测结果符合得较好.

关键词: 熔池表面变形, 电流密度, 分布模型

PACC: 5280, 0290

1 引 言

焊接电弧电流密度分布是电弧物理最基本、最重要的问题之一. 因为电流密度的分布直接决定了电弧热流密度、电弧压力等的分布, 而电弧热流密度分布描述了电弧热传输给焊件的方式, 电弧压力决定着熔池的表面形状. 因此电弧热流密度、电弧压力的分布直接影响着熔池的几何形状、焊缝成形、焊接接头的冷却特性, 最终决定着焊接接头的质量. 准确地描述电弧电流密度的分布, 不仅对于深入了解电弧物理的本质具有重要的理论意义, 而且对于控制焊接质量具有重要的实际意义. 世界各国的学者在建立焊接过程的传热模型时, 均采用了 Gaussian 分布的电流密度分布模型^[1, 2]. 对于熔池表面变形较小的钨极惰性气体保护电弧焊(TIG)而言, 这样处理基本上是合理的. 但在熔化极惰性气体保护电弧焊(MIG)焊接中, 由于熔滴冲击力的作用和电弧压力的大幅度提高, 使熔池表面产生了严重的变形, 电弧正下方有较大的下凹变形, 而电弧后方熔池表面隆起, 熔池表面变为复杂形状的曲面, 电流非常明显地受到熔池表面形状的限制, 使其分布模式发生变化. 电流密度分布模式的变化, 引起电弧压力分布的改变, 电弧压力分布的改变又会影响到熔池的表面

变形, 而熔池的表面变形反过来又会影响到电流密度的分布. 本文根据电弧物理的基本原理, 综合考虑熔池表面变形和电流密度的动态耦合作用, 建立熔池表面变形情况下的电流密度分布模型, 并定量分析熔池表面变形对电流密度分布的影响规律.

2 电弧电流密度的分布模型

自由电弧, 事实上是两个电极之间的一个气体导体. 这个导体的断面不像固体导电那样形状固定不变, 它可以自由扩大和收缩其导电断面. 但当电流一定, 周围条件(气体介质成分、温度、压力等)一定时, 电弧的各区(阳极区、阴极区、弧柱区)总有相应的导电断面, 导致它们选择某一确定断面的机理就是最小电压原理. 这个原理的基本内容是, 在电流不变, 周围条件一定时, 稳定燃烧的电弧将自动选取某种导电断面(其大小可用直径来表示)以保证在此条件下, 可能产生最低的电场强度, 即在固定长度上的电压最小, 这就是最小电压原理^[3]. 根据这一原理, 弧柱中的电流应沿最短路径流入熔池. 图 1 表示 MIG 焊接试件在 $y=0$ 截面上电流密度的分布示意图, 设 L_1, L_2 分别为焊丝端部 W 至焊丝中心线两侧熔池表面曲线 ($y=0$ 截面与熔池上表面的交线)的最短距离. 即, $O_1W=L_1, O_2W=L_2, O'$ 点为

* 国家教育部优秀青年教师基金资助的课题.

电弧中心线与熔池表面最大下凹处的交点, $O'W = L_0$. 由图 1 可见, 在熔池表面变形较大的情况下, $L_0 > L_1, L_0 > L_2$, 这样, 较多的电流就会通过以 L_1, L_2 所代表的路径流入熔池, 而在离开 L_1, L_2 的部位, 流入的电流较少. 假设局部电流密度在变形后的熔池表面上分别以 O_1, O_2 为原点按高斯函数分布, 即

$$\text{在 } O_1 \text{ 点 } J_1(s) = J_{1m} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_{j1}^2}\right);$$

$$\text{在 } O_2 \text{ 点 } J_2(s) = J_{2m} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_{j2}^2}\right),$$

式中 J_{1m}, J_{2m} 分别为 O_1, O_2 点的最大电流密度; σ_{j1}, σ_{j2} 为电流分布参数; s 为从原点 O_1 或 O_2 开始的曲线弧长.

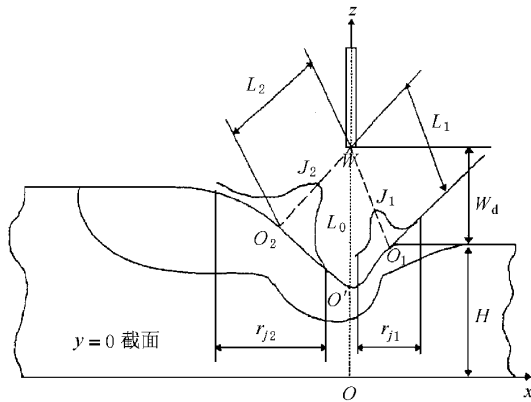


图 1 MIG 焊接试件在 $y=0$ 截面上电流密度的分布示意图

根据 Tsai 等人^[4]关于 σ_j 与弧长 L 基本成正比例关系的实验结果, 假定有下式成立:

$$\frac{\sigma_{j1}}{L_1} = \frac{\sigma_{j2}}{L_2}. \quad (1)$$

因焊丝端部 W 至熔池表面的距离 L 越大, 流过此处熔池表面的电流密度越小, 假定 J_m 与 L 成反比, 即

$$J_{1m}L_1 = J_{2m}L_2. \quad (2)$$

焊丝端部 W 至工件表面的距离 W_d 影响电流分布参数的大小. W_d 越大, 电流在熔池表面上的作用区域越大, 所以电流分布参数越大; W_d 越小, 电流分布参数越小. 电流分布的区域 $r_{j1} + r_{j2}$ 与 W_d 满足以下关系:

$$r_{j1} + r_{j2} = b(W_d), \quad (3)$$

$b(W_d)$ 是 W_d 的函数, 文献 [4, 5] 通过试验和计算方法研究了焊接工艺参数对电流密度在工件表面上分布区域大小的影响规律, 本文根据这些实验及计

算结果选取 $b(W_d)$.

求解能量方程、动量方程、连续性方程和熔池表面变形的控制方程^[2,1], 可以确定熔池表面的曲面方程. 根据熔池表面上的坐标和焊丝端部点 W 的坐标 $(0, 0, z_0)$, 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

$$O_1(x_1, 0, H - \Phi(x_1, 0)),$$

$$O_2(x_2, 0, H - \Phi(x_2, 0)),$$

$$O_3(0, y_1, H - \Phi(0, y_1)),$$

$$O_4(0, -y_1, H - \Phi(0, -y_1)),$$

熔池表面凹陷最低点 O' 的坐标为 $(0, 0, H - \Phi(0, 0))$.

根据图 2 所示的几何关系, 由 (3) 式可得到

$$\frac{2\sqrt{6}\sigma_{j1}x_1}{\sqrt{x_1^2 + [\Phi(x_1, 0) - \Phi(0, 0)]^2}} + \frac{2\sqrt{6}\sigma_{j2}|x_2|}{\sqrt{x_2^2 + [\Phi(x_2, 0) - \Phi(0, 0)]^2}} = b(W_d). \quad (4)$$

由 (1) 和 (4) 式联立求解, 可求出 σ_{j1}, σ_{j2} .

如图 2 所示, 当 O_1, O_2, O_3, O_4 不在一个水平面上时, 取 4 点 z 坐标的平均值作为一系列电流密度分布原点的 z 坐标值, 即

$$z^* = H - \frac{\Phi(x_1, 0) + \Phi(x_2, 0) + \Phi(0, y_1) + \Phi(0, -y_1)}{4}. \quad (5)$$

即在变形后的熔池表面上, 将 z 坐标值为 z^* 的所有点连接起来, 构成一条封闭的曲线, 一系列局部电流密度分布的原点都处在该封闭曲线上.

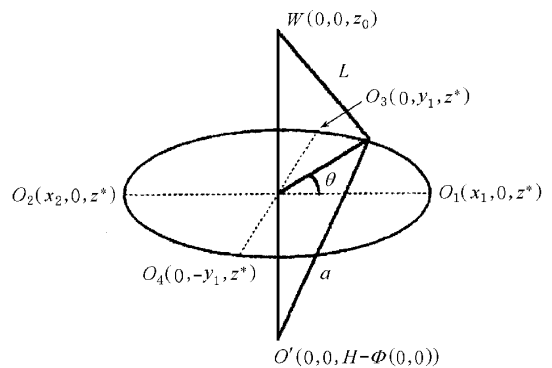


图 2 焊接电流密度分布原点之间的几何关系

电流密度分布与焊丝端部点 W 到熔池表面的距离 L 有关, 熔池表面非 O_1 和 O_2 点的电流密度分布参数 $J_m(\theta), \sigma_j(\theta)$ 由 J_{1m}, J_{2m} 及 $\sigma_{j1}, \sigma_{j2}(y=0$

截面上 O_1 和 O_2 点的参数)通过插值求出.

当 $\theta = 0^\circ - 90^\circ$,

$$J_m(\theta) = J_{2m} + \frac{J_{1m} - J_{2m}}{L_1 - L_2} (\sqrt{x_1^2 \cos^2 \theta + y_1^2 \sin^2 \theta + (z_0 - z^*)^2} - L_2), \quad (6)$$

$$\sigma_j(\theta) = \sigma_{j1} + \frac{\sigma_{j2} - \sigma_{j1}}{L_2 - L_1} (\sqrt{x_1^2 \cos^2 \theta + y_1^2 \sin^2 \theta + (z_0 - z^*)^2} - L_1), \quad (7)$$

$$a(\theta) = \sqrt{x_1^2 \cos^2 \theta + y_1^2 \sin^2 \theta + (z^* - H + \Phi(0, \rho))^2}; \quad (8)$$

当 $\theta = 90^\circ - 180^\circ$,

$$J_m(\theta) = J_{2m} + \frac{J_{1m} - J_{2m}}{L_1 - L_2} (\sqrt{x_2^2 \cos^2 \theta + y_1^2 \sin^2 \theta + (z_0 - z^*)^2} - L_2), \quad (9)$$

$$\sigma_j(\theta) = \sigma_{j1} + \frac{\sigma_{j2} - \sigma_{j1}}{L_2 - L_1} (\sqrt{x_2^2 \cos^2 \theta + y_1^2 \sin^2 \theta + (z_0 - z^*)^2} - L_1), \quad (10)$$

$$a(\theta) = \sqrt{x_2^2 \cos^2 \theta + y_1^2 \sin^2 \theta + (z^* - H + \Phi(0, \rho))^2}. \quad (11)$$

将电流密度在其整个分布区域上积分,有如下关系式成立:

$$\int_0^\pi \int_{-\infty}^\infty J_m(\theta) \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_j^2(\theta)}\right) s + a(\theta) ds d\theta = \frac{I}{2}, \quad (12)$$

式中 I 为焊接电流,将(6)~(11)式代入(12)式并和(2)式联立,得到一个关于 J_{1m} 、 J_{2m} 的方程组,可求出 J_{1m} 、 J_{2m} 。已知 J_{1m} 、 J_{2m} 和 σ_{j1} 、 σ_{j2} ,根据(6)~(11)式可以求出熔池表面局部电流密度分布封闭曲线上任一 θ 角的 $J_m(\theta)$ 和 $\sigma_j(\theta)$ 。这样就确定了变形后熔池表面上任意点的电流密度值,

$$J(\theta, s) = J_m(\theta) \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_j^2(\theta)}\right), \quad (13)$$

式中 s 为所求点到电流密度分布原点(位于图2的封闭曲线上)的径向距离。

3 计算结果与应用

在上述电弧电流密度分布模型的基础上,确定电弧热流密度、电弧压力的分布,采用文献[2]中建立的描述熔池行为的数学模型,求解 MIG 焊接熔池温度场、流场和熔池的表面变形,所用材料为低碳钢 Q195,尺寸为 $150 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,材料的热物性参数见文献[2]。

图3所示为熔池表面形状的计算结果,所采用的焊接工艺参数亦见图6。可见,由于熔滴冲击力和电弧压力的作用,电弧正下方的熔池表面下凹,低于未熔化的试件表面,最大下凹为 1.89 mm 。由于这一凹陷变形及填充金属的加入,电弧后方的熔池表面隆起,高于未熔化的试件表面,因此形成了凝固后的

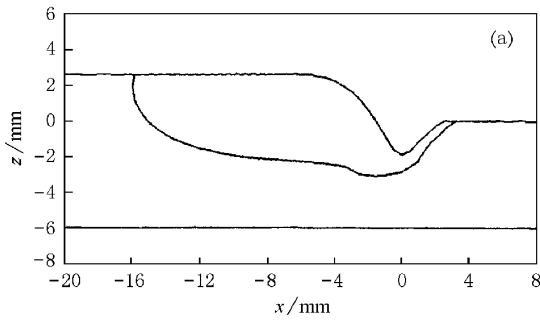
焊缝余高部分,余高为 2.59 mm 。

在图3所示熔池表面形状的情况下,电流密度分布的计算结果如图4所示。图4(a)表示电弧电流密度在不同纵截面上的分布,图4(b)为三维图。可见在纵向截面上($y=0 \text{ mm}$),电流密度呈双峰分布,这个双峰分布关于 y 轴是不对称的,而向 x 轴负方向偏移, x 轴上两个峰值分别位于 $x = -4 \text{ mm}$ 和 $x = 2.5 \text{ mm}$ 处,这是由于电弧中心线后面的熔池表面变形较大造成的。随着纵截面位置远离焊缝中心线(y 坐标值的增大),双峰分布逐渐消失,当 y 的坐标值等于或大于 3.0 mm 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,更多的电流从离开电弧中心线一定距离的熔池表面流过。

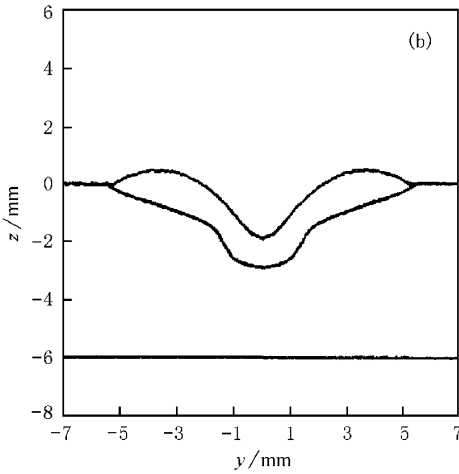
表1给出了熔池表面上不同点的电流密度分布参数 J_m 、 σ_j 和电流密度分布原点坐标与 θ 的关系,

表1 熔池表面上不同点的电流密度分布原点坐标和分布参数 J_m 、 σ_j

$\theta/(\circ)$	(x, y, z^*)	$J_m/(10^6 \text{ A/m}^2)$	$\sigma_j/10^{-3} \text{ m}$
0	(2.50, 0.00, 5.46)	3.4890	2.7581
30	(2.28, 1.32, 5.46)	3.4776	2.8229
60	(1.49, 2.57, 5.46)	3.4627	2.9045
90	(0.00, 3.20, 5.46)	3.4540	2.9270
120	(-1.68, 2.91, 5.46)	3.4316	2.9392
150	(-3.24, 1.87, 5.46)	3.4183	2.9428
180	(-4.00, 0.00, 5.46)	3.4095	2.9540



(a) $y=0$ mm 纵向截面

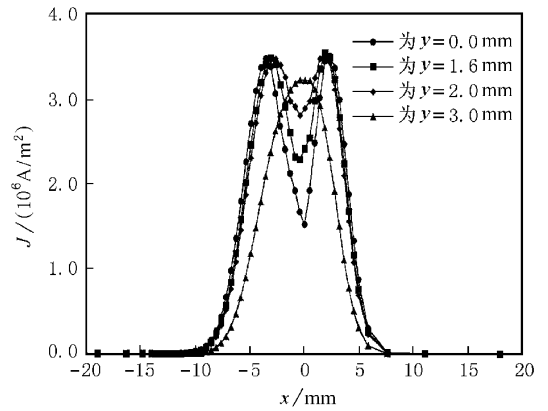


(b) $x=0$ mm 横向截面

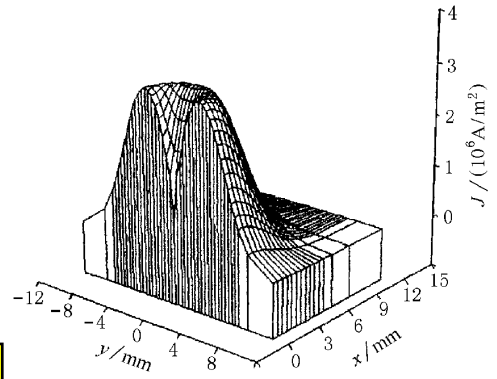
图3 MIG焊接熔池几何形状的计算结果

mild steel, 试件厚度 H 为 6 mm, 焊接电流 I 为 240 A, 电弧电压为 $V=25$ V, 焊接速度 u_0 为 430 mm/min, 焊丝直径 d 为 1.2 mm, 焊丝干深长度 W_e 为 16 mm

接电流的增大, 熔池表面的下凹变形和隆起高度均增大, 电流密度的双峰分布也变得更加明显。



(a) 纵向分布



(b) 三维图

图4 电流密度分布的计算结果 图注同图3

熔池的表面变形随着 θ 的变化而改变, 决定电流密度分布的参数 J_m, σ_j 也就随之发生变化。

图5表示熔池表面变形不同时, 电流密度在 $y=0$ mm 纵向截面上双峰分布的计算结果。最大电流密度与电弧中心线处电流密度的比值(HF)越大, 说明双峰分布越明显, 表2表示焊接电流对熔池表面变形参数、HF特性参数的影响规律, 可见随着焊

表2 焊接电流对熔池表面变形、HF 特性参数的影响

焊接电流 I/A	熔池表面变形参数		HF
	最大下凹/mm	隆起高度/mm	
150	0.66	0.77	1.35
240	1.89	2.59	2.51
300	2.85	3.39	4.00

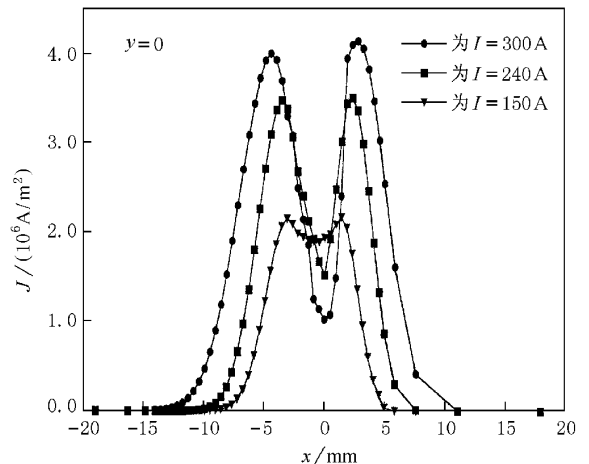
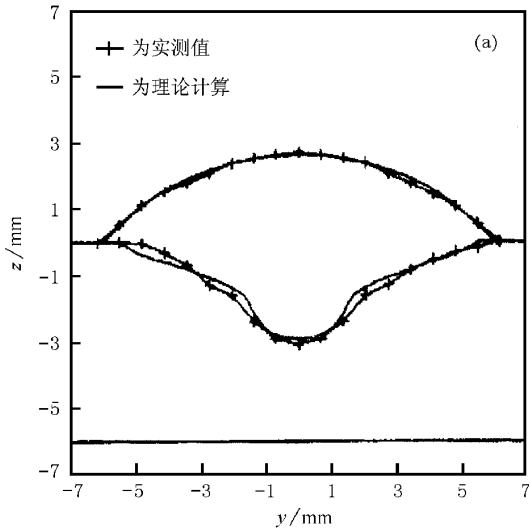


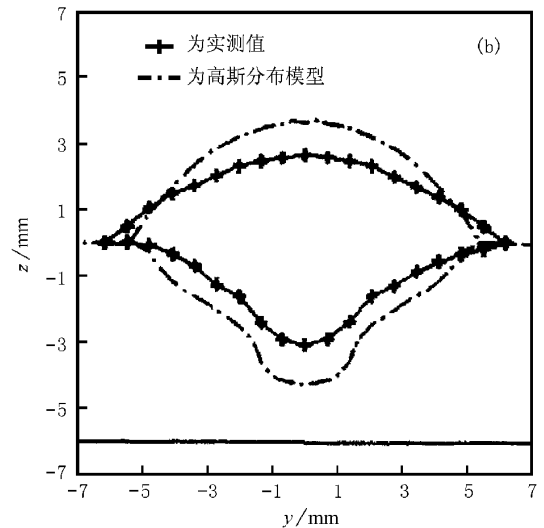
图5 熔池表面变形对电流密度分布的影响 图注同图3

带电粒子的运动是电弧向焊接熔池传输热能的主要方式^[3],电流密度大的区域,带电粒子的密度大,其传输的热能就多,热流密度就大。相反,流过电流少的区域,带电粒子的密度小,其传输的热能就少,热流密度就小。因此,电流密度的大小决定了热流密度的大小。根据本文提出的电流密度分布模型,作者建立了双峰分布的电弧热流密度分布模型^[6],

成功地求解了熔池的流场和温度场,图 6 为采用双峰分布模型、高斯分布模型计算的焊缝横截面几何形状与实测结果的比较,可见双峰分布模型的计算与实测结果基本符合,与采用高斯分布模型相比,精度显著提高,从而间接验证了本文提出的电流密度分布模型的可靠性。



(a) 本文的热流密度分布模型



(b) 高斯热流密度分布模型

图 6 两种热流密度模型计算出的焊缝几何形状与实测值的比较 图注同图 3

4 结 论

1. 根据电弧物理的基本原理,提出了 MIG 焊接电流密度在变形熔池表面上的分布模型,由于焊接电流密度分布模型问题复杂性,需要更多的工作进一步完善该模型。

2. 计算结果表明, MIG 焊接电流密度在电弧中

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。熔池的表面凹陷深度、隆起高度越大,电流密度在电弧中心线附近的双峰分布就越显著。

3. 采用基于电流密度双峰分布模型的电弧热流密度分布模型,成功地计算了焊接熔池的流场和温度场,焊缝横截面几何形状的计算与实测结果符合得较好,与高斯分布模型相比,计算精度显著提高。

- [1] E. Pardo, *Metal. Trans.* **20B**(1989) 937.
 [2] C. S. Wu, L. Dorn, *Acta Metallurgica Sinica*, **33**(1997), 774 (in Chinese) [武传松, L. Dorn, *金属学报*, **33**(1997), 774].
 [3] J. F. Lancaster, *The Physics of Welding* (Pergamon Press,

1986) p. 135.

- [4] N. S. Tsai, T. W. Eagar, *Metal. Trans.* **16B**(1985), 841.
 [5] J. W. Kim, S. J. Na, *Welding. J.* **5**(1995), 142S.
 [6] C. S. Wu, J. S. Sun, *Comput. Mater. Sci.*, **9**(1998) 397.

THE INFLUENCE OF WELDPool SURFACE SHAPE ON THE DISTRIBUTION OF ARC CURRENT DENSITY^{*}

SUN JUN-SHENG WU CHUAN-SONG

(*College of Materials Engineering ,Shandong University ,Jinan 250061 , China*)

(Received 10 March 2000 ; revised manuscript received 30 April 2000)

ABSTRACT

The distribution mode of arc current density determines the distribution modes of both arc heat flux and arc pressure , which are the basis to understand the physical nature of welding arc and to establish the mathematical model of welding processes. Based on the general principle of arc physics , a distribution model of current density on the deformed weldpool surface is established in this paper. Quantitative analysis is carried out to determine the influence of weldpool surface shape on the distribution of current density. The predicted results show that the distribution of current density is bimodal distribution near the arc centerline , and that with increasing distance from the arc centerline the bimodal distribution is gradually diminished. The distribution mode of current density is markedly modified by the shape of weldpool surface. According to this distribution model , the predicted weld geometry is in agreement with the measured one.

Keywords : weldpool surface deformation , arc current density , distribution mode

PACC : 5280 , 0290

^{*} Project supported by the Foundation of State Education Ministry of China for Outstanding Young Teachers in University.