

PAW+TIG 电弧双面焊接小孔形成过程的数值模拟 *

孙俊生 武传松 董博玲

(山东大学材料液态结构及其遗传性教育部重点实验室, 济南 250061)

Y. M. Zhang

(Center for Robotics and Manufacturing Systems, University of Kentucky, Lexington, KY 40506-0108, USA)

摘 要 综合考虑影响等离子弧小孔形成的等离子流力、重力、表面张力等力学因素,建立了等离子电弧 + 钨极电弧 (PAW+TIG) 双面焊接时小孔形成过程的数学模型,并与焊接传热的控制方程耦合,采用数值模拟技术,定量分析了小孔形成的动态过程. 根据数值分析结果,将小孔的形成过程分为开始焊接到熔透、熔透到开始穿孔、开始穿孔到小孔形态稳定三个阶段,熔池的最小跨距可作为小孔建立的评价指标. 小孔的形成是热、力共同作用的结果.

关键词 PAW+TIG 电弧, 双面焊, 小孔形成, 动态过程, 数值模拟

中图法分类号 TG44, TG115

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2003)01-079-05

NUMERICAL SIMULATION OF KEYHOLE FORMATION DURING PAW+TIG DOUBLE-SIDED ARC WELDING

SUN Junsheng, WU Chuansong, DONG Boling

Key Lab. of Liquid Structure and Heredity of Materials, Ministry of Education, Shandong University, Jinan 250061

Y. M. Zhang

Center for Robotics and Manufacturing Systems, University of Kentucky, Lexington, KY 40506-0108, USA

Correspondent: Sun Junsheng, professor, Tel: (0531)8395987, Fax: (0531)8392711,

E-mail: mstsun@sdu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of USA (DMI-9812981)

Manuscript received 2002-03-16, in revised form 2002-06-14

ABSTRACT The mathematic model of keyhole formation in double-side arc welding is established through considering all influencing dynamic factors, such as plasma arc pressure, gravity and surface tension. With the numerical simulation technology, the dynamic process of keyhole formation is quantitatively analyzed by coupling the keyhole model with the governing equations of heat transfer. According to the numerical analysis results, the keyhole formation may be divided into three stages: from welding start to penetration, from penetration to perforation and from perforation to stable keyhole state. The minimum span in the weldpool may be regarded as the evaluation criterion of keyhole formation. The keyhole formation results from the common actions of heat and forces.

KEY WORDS PAW+TIG arc, double-sided arc welding, keyhole formation, dynamic process, numerical simulation

目前主要采用电弧焊工艺制造大型的金属结构,如船壳和压力容器等. 由于电弧的熔透能力所限,母材往往需要单面或双面开坡口进行多道焊,开坡口不仅占用机时和人力,而且填充坡口也消耗大量的焊接材料,所以中厚板

多层焊焊接生产率低、产品成本高,还容易导致层间夹渣和热影响区扩大等问题. 这些问题随着板厚的增加也变得更加严重,提高电弧的穿透能力成为解决上述问题的关键. 虽然激光焊和电子束焊的熔透程度比较大,但其工艺和设备造价高昂,对工件装配精度要求高,难以大范围的推广应用.

单电源双面电弧焊 (DSAW) 工艺是提高电弧穿透力的有效工艺^[1]. 由等离子电弧 + 钨极电弧 (PAW+TIG) 组成的焊接系统^[2],利用了等离子电弧收缩强烈,等离子流力较大,可产生小孔的优点,同时双面电弧焊接系统

* 美国国家自然科学基金 DMI 9812981 和哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室开放课题资助项目
收到初稿日期: 2002-03-16, 收到修改稿日期: 2002-06-14
作者简介: 孙俊生,男, 1963 年生,教授,博士

又可以迫使焊接电流沿板厚的方向流过,从而显著提高了电弧的穿透能力.该焊接工艺的技术关键是稳定建立起小孔,因为这关系到 DSAW 焊接工艺过程稳定和焊接质量的可靠性.但目前对等离子弧焊接小孔形成过程的物理机制研究较少,对其稳定建立的过程缺乏全面深入的了解.由于熔池的温度高、体积小、还有电弧光的强烈干扰,采用实验方法研究难度较大,目前数值模拟虽是一种有效手段,但由于其物理现象复杂,研究报道也较少.文献 [3] 研究了固定单面等离子电弧作用下的二维传热与流体流动的情况,与实际情况相差较远,而双面电弧的尚未见报道.本文综合考虑影响等离子弧小孔形成过程的力学因素和传热过程,建立小孔形成过程的数学模型,并与焊接传热的控制方程耦合,采用数值模拟技术揭示小孔形成过程的物理本质,为 DSAW 工艺的优化设计和推广应用提供基础技术数据.

1 数值分析模型的建立

图 1 为单电源双面电弧焊 (DSAW) 过程的示意图.工件处于平焊位置,工件上方为等离子电弧 (PAW),下方为 TIG 电弧.两个电弧均以恒定速度 u_0 沿 x 方向运动,坐标系 $o-xyz$ 以与电弧相同的速度运动,并且它

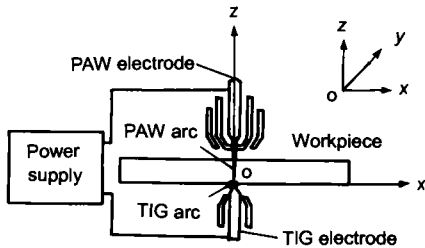


图 1 DSAW 焊接过程的示意图及坐标系

Fig.1 Sketch of DSAW welding system and coordinate system

1.1 熔池表面变形与小孔形成过程的数学描述

图 2 为 DSAW 小孔形成过程中某一时刻熔池纵截面几何形状的示意图.工件上表面 PAW 一侧的熔池在等离子流力 P_p 、重力 $\rho g \psi$ 、表面张力 γ 的作用下产生变形.根据变分法原理,经系列推导可得出 PAW 熔池表面变形的控制方程 (1) [4,5],

$$P_p - \rho g \psi + \lambda_p = -\gamma \frac{(1 + \psi_y^2)\psi_{xx} - 2\psi_x\psi_y\psi_{xy} + (1 + \psi_x^2)\psi_{yy}}{(1 + \psi_x^2 + \psi_y^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

式中 ρ 为液态金属的密度, g 为重力加速度, λ_p 为 Laplace 变换因子, λ_p 的物理意义是除了 $P_p, \rho g \psi, \gamma$ 之外的所有作用于熔池表面的力的平均值. ψ 为熔化表面变形的形状函数,带角标的 ψ 表示 ψ 对角标变量的偏导

数,如 $\psi_x = \frac{\partial \psi}{\partial x}$. 等离子流力 P_p 根据等离子体的密度和速度由式 (2) 按 Gauss 分布处理 [6],

$$P_p = P_{pmax} \exp(-\frac{3r^2}{r_p^2}) \quad (2)$$

其中, r_p 为等离子流力的分布半径,本文近似取为喷嘴的直径,即 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$; $P_{pmax} = \frac{1}{2} \rho_{arc} v_{arc}$, ρ_{arc}, v_{arc} 分别为氩等离子体在其平均温度 1.5×10^4 K 下的密度和速度, v_{arc} 根据喷嘴出口面积 A 、保护气体的流量 L_0 和密度 ρ_0 以及等离子体的密度 ρ_{arc} 由下式确定,

$$\rho_{arc} v_{arc} A = \rho_0 L_0 \quad (3)$$

等离子体的密度 ρ_{arc} 与等离子体的温度有关,根据实验数据确定 [6].

在图 2 所示的坐标系下,工件 TIG 侧熔池的表面变形方程如下,

$$-P_T + \rho g(\psi - H) + \lambda_T = -\gamma \frac{(1 + \psi_y^2)\psi_{xx} - 2\psi_x\psi_y\psi_{xy} + (1 + \psi_x^2)\psi_{yy}}{(1 + \psi_x^2 + \psi_y^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

式中, P_T 为 TIG 电弧压力, λ_T 为 Laplace 变换因子, H 为工件厚度.

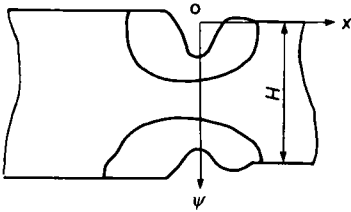


图 2 DSAW 小孔形成过程中熔池纵截面几何形状的示意图

Fig.2 Sketch of longitudinal cross-section prior to formation of keyhole

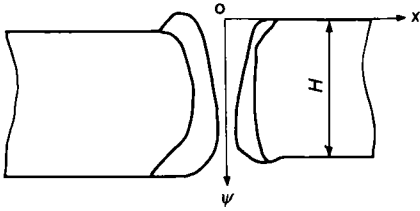


图 3 DSAW 小孔稳定状态熔池纵截面几何形状的示意图

Fig.3 Sketch of longitudinal cross-section of weld pool after keyhole hole formation

小孔形成后,上下两个熔池连为一体,将其作为一个熔池处理,该熔池纵截面几何形状与坐标系如图 3 所示.作用于熔池表面上的力有等离子流力 P_p 、TIG 电弧压

力 P_T 、重力 $\rho g\psi$ 、表面张力 γ ，熔池表面变形的控制方程为 [4]，

$$P_p - P_T + \rho g\psi + \lambda = -\gamma \frac{(1 + \psi_y^2)\psi_{xx} - 2\psi_x\psi_y\psi_{xy} + (1 + \psi_x^2)\psi_{yy}}{(1 + \psi_x^2 + \psi_y^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

熔池表面变形控制方程式 (1)，式 (4)，式 (5) 的边界条件为：

$$\psi(x, y) = 0, \quad T \leq T_L \quad (6)$$

式中 T_L 为被焊工件材料的液相线温度，式 (6) 的物理意义是工件表面固相区域无变形。

1.2 DSAW 的传热模型

在小孔的形成过程中，工件正反面的熔池表面均发生了严重变形，变形熔池表面上边界条件的描述以及控制方程的处理是数值模拟的难点之一，本文采用适合于熔池表面变形的非正交帖体曲线坐标系解决这一问题。即令

$$x = x, y = y, \quad z^* = \frac{z - [\psi(x, y) - H]}{H} \quad (7)$$

式中， $\psi(x, y)$ ， $\psi(x, y) - H$ 分别是工件上表面和下表面（包括熔池上、下表面的边界）的曲面方程，其中， H 为工件厚度。

在工件上表面， $z = \psi(x, y)$ ，故 $z^* = 1$ ；而在工件下表面， $z^* = 0$ 。这样就实现了从直角坐标系 $x - y - z$ 向曲线坐标系 $x - y - z^*$ 的转换。在图 1 所示的直角坐标系 $o - xyz$ 和非正交帖体曲线坐标系 $o - xyz^*$ 下，描述焊接传热的能量方程分别为式 (8) 和 (9)，

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} - u_0 \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (8)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} - u_0 \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S \frac{\partial}{\partial z^*} \left(K \frac{\partial T}{\partial z^*} \right) + C_t K \quad (9)$$

其中

$$C_t = 2 \left(\frac{\partial z^*}{\partial x} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial z^*} + \frac{\partial z^*}{\partial y} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y \partial z^*} \right)$$
$$S = \left(\frac{\partial z^*}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial z^*}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial z^*}{\partial z} \right)^2$$

式中， K 为导热系数， c_p 为定压比热容， t 为时间， T 为温度。

能量方程的边界条件如下，

工件上表面

$$-K \cdot \nabla T \cdot \vec{n}_b = q_{pq} \quad (10)$$

工件下表面

$$-K \cdot \nabla T \cdot \vec{n}_b = q_{pT} \quad (12)$$

$$q_{pT} = \frac{\eta_T I U_T}{2\sigma_{pT}^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_{pT}^2}\right) \quad (13)$$

其中， $\vec{n}_b$ 为工件表面的单位法向矢量， η_p, η_T 分别为 PAW, TIG 电弧的热效率，文献 [7] 测试得到常规 PAW 焊接的 η_p 为 0.55，而 TIG 焊接的 η_T 为 0.6—0.7^[8]，考虑到 DSAW 焊接使得能量集中，热效率提高，本文根据以上实验数据和计算结果与实测结果吻合的原则，统一取值 0.68。 σ_{pq}, σ_{pT} 分别为 PAW, TIG 电弧的热流密度分布参数，本文取值分别为 1.56 mm^[9] 和 2.45 mm^[8]。 U_p, U_T 分别为 PAW 电弧和 TIG 电弧的电压。

对于其他表面

$$K \cdot \nabla T = \alpha(T - T_0) \quad (14)$$

式中， α 为换热系数， T_0 为环境温度。

2 计算结果与讨论

采用有限差分技术、非正交帖体曲线坐标系以及非均匀网格，利用上述双面电弧焊小孔形成过程和传热的数学模型，对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢双面焊接小孔形成的动态过程进行数值模拟。所用工件尺寸为 150 mm×80 mm×9.5 mm。双面电弧焊接的工艺条件见表 1，1Cr18Ni9Ti 的热物理性能参数见文献 [2]。

表 1 双面电弧焊接的工艺条件
Table 1 The condition of DSAW welding process

Parameter	PAW	TIG
Electrode diameter, mm	4.8	4.8
Electrode stand off distance, mm	6	10
Orifice diameter, mm	1.57	—
Flow rate of shielding gas, L/min	13.8	23
Flow rate of plasma gas, L/min	1.15	
Welding heat input, kJ/cm		23.19
Other parameter	Current: 67A; Speed: 1.3 mm/s; Voltage: 45V	

图 4 为 DSAW 焊接时小孔形成动态过程的计算结果，图中横坐标 $x=0$ 的点为开始焊接的位置。图 5 和 6 分别为熔池凹陷和隆起尺寸随时间变化的计算结果，图中标出了熔池熔透和小孔开始形成的位置。由图 4 可见，小孔是在焊接 1.65 s 后开始产生，再经过 0.1 s 后，小孔的形状和尺寸才稳定下来，焊接过程达到准稳态。达到准稳态之前的焊接过程可以分为三个阶段，即开始焊接到熔透、熔透到开始穿孔和穿孔到小孔形态稳定。

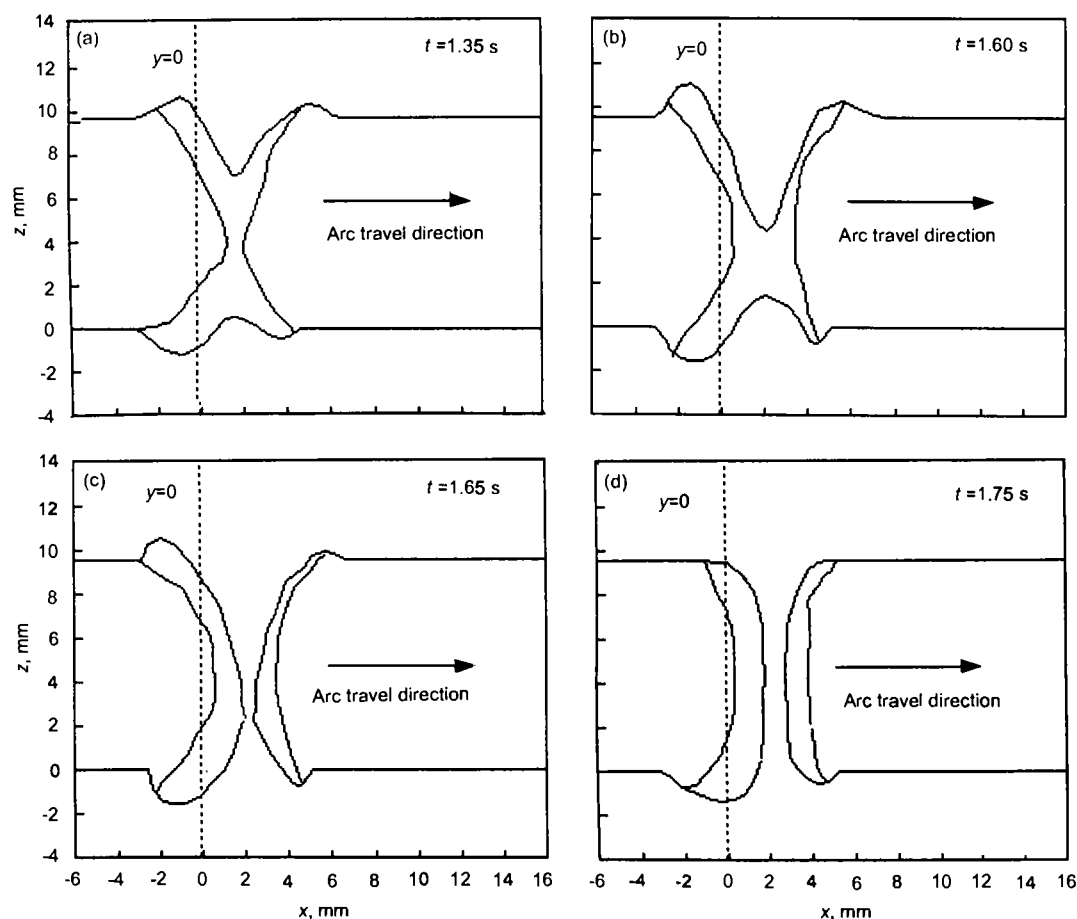


图 4 小孔形成过程的计算结果

Fig.4 The calculated results of keyhole formation process (dotted line indicates welding start position)

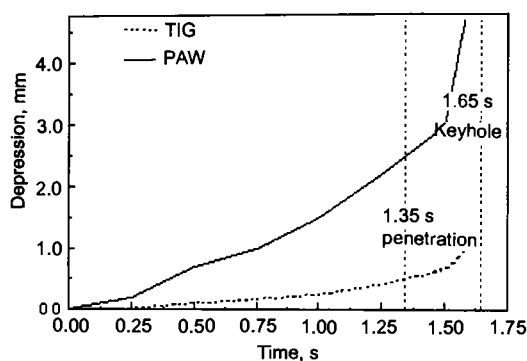


图 5 熔池的凹陷随时间的变化

Fig.5 Weldpool depression vs welding time

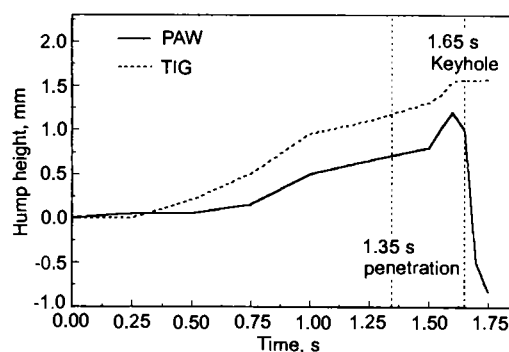


图 6 熔池的隆起随时间的变化

Fig.6 Weldpool height vs welding time

焊接时间 0—1.35 s 为开始焊接到熔透阶段, 从图 4—6 可以看出, 随着焊接时间的增加, 工件正反两面熔池的体积逐渐增大, PAW 侧、TIG 侧熔池的凹陷和熔深也逐渐增加, 由图 5 可以看出, PAW 侧熔池凹陷的速度大约为 1.9 mm/s, 而 TIG 侧的仅为 0.37 mm/s. 1.35—1.60 s 为第二阶段, 1.35 s 时 PAW 一侧的熔合线与 TIG 一侧的熔合线相交, 熔池的液态金属在工件厚度方向贯通, 两个熔池合并为一个熔池, 此熔池最窄处的宽度

仅为 0.70 mm(见图 4a), 随着时间的进一步推移, 熔池最窄处的宽度迅速增大, 再经过 0.25 s(即焊接 1.60 s), 最窄处的宽度增大到 2.83 mm(见图 4b), 随后在等离子流力和重力的作用下, 很快出现小孔, 进入第三个阶段. 1.65—1.75 s 为第三个阶段, 1.65 s 开始形成的小孔, 其最小直径为 0.4 mm(见图 4c), 由图 6 可见, 此时 PAW 侧熔池尾部的隆起为 1.0 mm, 比穿孔前 1.60 s 的 1.2 mm 减少了 0.2 mm, 而 TIG 侧熔池尾部隆起高度为 1.56 mm, 比穿

孔前 1.60 s 的 1.55 mm 略有增加, 这显然是由于位于上表面 PAW 侧熔池的液态金属因重力作用, 通过小孔流入背面的 TIG 侧熔池造成的. 随着时间的推移, 小孔最小直径逐渐变大, 1.70 s 时达到 0.7 mm, 同时 PAW 侧熔池尾部的隆起也进一步减小到低于工件上表面 0.5 mm, TIG 侧熔池尾部液态金属的隆起增至 1.562 mm; 1.75 s 时 (见图 4d), PAW 侧熔池尾部的隆起减小到低于工件上表面 0.833 mm, TIG 侧熔池尾部的液态金属隆起达到 1.57 mm (见图 6), 小孔的最小直径为 1.0 mm, 达到准稳定状态.

由图 5 的计算结果可以看出, $t=1.5$ s 时, 熔池凹陷 (即穿孔) 的速度急剧增大, 达到 40 mm/s 左右, 穿孔速度的急剧增加与熔池几何形状的变化有关. 图 7 为熔池纵截面几何形状及最小跨距示意图, 图中 $x_{mf}(z)$ 为熔池前部的熔合线, $x_{mr}(z)$ 为熔池后部的熔合线, $S(z) = X_{mr}(z) - X_{mf}(z)$ 则表示了熔池在 z 方向的跨距, S_{min} 为熔池在纵截面方向的最小跨度, 如图 7b 所示. 熔池的最小跨距 S_{min} 越大, 其承受电弧力的能力越差, 越容易形成小孔. 图 8 表示熔透之后, 最小跨距 S_{min} 随时间的变化关系, 当 $t=1.5$ s 时, S_{min} 达到 1.5 mm, 此时穿孔速度急剧增大, 并很快建立起小孔. 因此, 最小跨距 s_{min} 可作为小孔建立的评价指标.

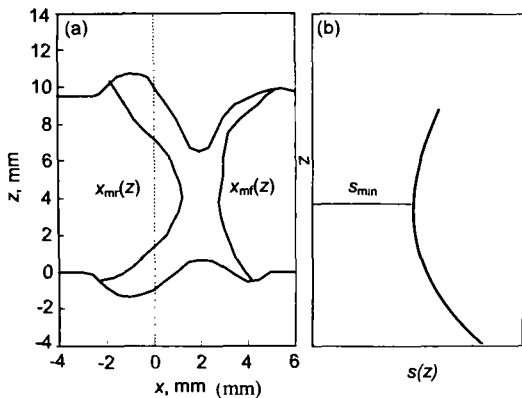


图 7 熔池纵截面的几何形状及最小跨距

Fig.7 Geometry and the smallest span (S_{min}) of the weldpool in longitudinal direction

综上所述, 在小孔的形成过程中, 工件正反面的电弧热传入工件, 使熔池的尺寸逐渐扩大, 两侧的熔合线相交, 熔池在纵截面上的最小跨距逐渐增大, 达到一定值以后, 在等离子流力、重力的作用下, 则快速形成小孔. 所以小孔是热、力共同作用的结果.

图 9 为焊缝横截面几何形状的计算和实测结果 (PAW, TIG 的电极直径: 4.8 mm, PAW 电极距离工件: 6 mm, TIG 电极距离工件: 10 mm, 焊接电流: 67 A, 焊接速度: 1.3 mm/s), 可见计算值和实测值吻合

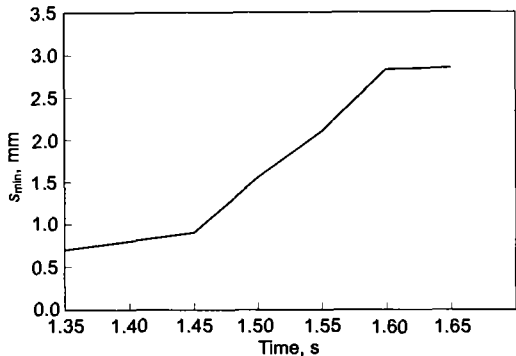


图 8 熔池纵截面上的最小跨距随时间的变化关系

Fig.8 The smallest span of the weldpool in longitudinal direction vs welding time

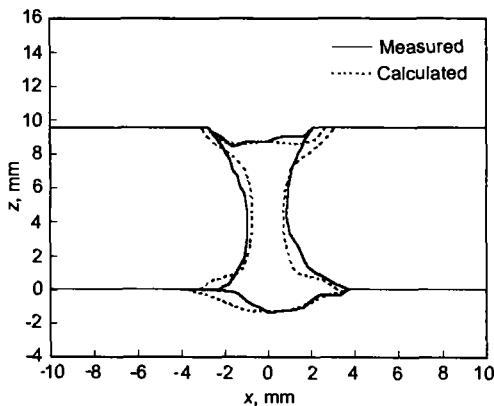


图 9 焊缝横截面几何形状的计算和实测结果

Fig.9 Comparison between the measured weld dimensions and the calculated ones

良好, 证明了本文数值分析模型的可靠性.

3 结论

(1) 根据 DSAW 焊接过程的物理本质, 综合考虑作用于熔池上的各种力学因素, 利用变分法原理建立了小孔形成过程的数学模型.

(2) 计算结果表明, 小孔的形成是热、力共同作用的结果. 其过程可分为开始焊接到熔透、熔透到开始穿孔、开始穿孔到小孔形态稳定三个阶段. 在本文条件下, 焊接后的 1.35, 1.65 和 1.75 s 分别为开始熔透、穿孔和小孔达到稳定的时刻, 稳定时小孔的直径为 1.0 mm. 熔池的最小跨距可作为小孔建立的评价指标.

(3) DSAW 的工艺实验表明, 计算与实测结果吻合良好, 证明了模型的可靠性.

参考文献

[1] Zhang Y M, Zhang S B. *Weld J*, 1998; 77(6): 57
[2] Sun J S, Wu C S, Zhang Y M. *Acta Phys Sin*, 2002; 51: 286
(孙俊生, 武传松, Y. M. Zhang. 物理学报, 2002; 51: 286)
[3] Fan H G, Kovacevic R. *J Phys D: Appl Phys*, 1999: 2902

-
- [4] Sun J S, Wu C S. *Chin J Comput Phys*, 2001; 18: 544
(孙俊生, 武传松. 计算物理, 2001; 18: 544)
- [5] Sun J S, Wu C S. *Acta Phys Sin*, 2000; 49: 2427
(孙俊生, 武传松. 物理学报, 2000; 49: 2427)
- [6] Metcalfe J C, Quigley M B C. *Weld J*, 1975; 54: 535
- [7] Evans D W, Huang D. *Weld J*, 1998; 77(2): 53s
- [8] Wu C S. *Numerical Analysis of Welding Heat Transfer*. Harbin: Haerbin Institute Technology University Press, 1990: 158
(武传松. 焊接热过程数值分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990: 158)
- [9] Bashenko V V, Sosnin N A. *Weld J*, 1998; 67(10): 233s