小孔等离子弧焊接热场的有限元分析

王怀刚, 武传松, 张明贤 (山东大学材料连接技术研究所,济南 250061)

摘 要:根据小孔等离子弧焊接的工艺特点,建立了相应的热源模型和焊接热场的分 析模型。数值模拟结果表明,一般的双椭球体热源和三维锥体热源不能准确描述小孔 等离子弧焊接热过程。提出了改进型的三维锥体热源模型,可以较准确地计算焊缝的 正面和背面熔宽,但熔合线走向的计算精度仍较低。在此基础上,考虑等离子弧对熔池 的热 -力作用,建立了符合小孔形态的热源模型,对小孔等离子弧焊接热场进行了有限 元分析,计算出的小孔等离子弧焊缝形状与试验结果吻合良好。

关键词:等离子弧焊接;小孔;热源模型;热场;有限元分析

中图分类号: TG 44 文献标识码: A 文章编号: 0253 - 360X(2005)07 - 49 - 05

0序 言

小孔等离子弧焊接与常规钨极氩弧焊相比,具 有更优秀的工艺品质^[1]。然而,在焊接过程中,等 离子弧的稳定性差,对焊接工艺参数的变化比较敏 感,导致小孔的稳定性差,获得良好接头质量的合理 规范参数范围窄,可调裕度小,这些问题制约了该工 艺在工业中的大量应用^[1]。另一方面,近年来在中 厚板焊接工艺中,出现了一些新型高效焊接工艺,如 双面电弧焊(DSAW)^[23]和改进型小孔等离子弧焊 (MK – PAW)^[4]。这些新工艺都用到了小孔等离子 弧焊接。在小孔等离子弧焊过程中,熔池的小孔行 为是影响焊接工艺稳定性以及焊接质量的关键因 素^[5]。焊接热过程对小孔的建立与形成有决定作 用。因此,等离子弧焊接提供重要的基础数据,具有重要 的理论意义和实用价值。

目前, 在焊接热场的数值模拟研究方面, 关于等 离子弧焊接 (PAW), 尤其是小孔等离子弧焊接 (K – PAW)的数值模拟研究很少。文献 [6]针对固定电 弧等离子弧焊接过程建立了二维稳态热传导模型, 将焊接电流流经工件时产生的焦耳热当作热能方程 的源项进行计算, 但仅考虑二维稳态而且是固定电 弧的作用。文献 [7]对等离子弧焊接过程建立了三 维稳态有限元模型, 计算了小孔等离子弧焊接 熔池中的温度场和流场, 但这一模型做了大量的简

收稿日期: 2004-08-02

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目(104109)

化假设,没有考虑电磁力和熔化潜热的作用,并假设 电弧热传递只发生在熔池表面的小孔部分,在熔池 表面的其余部分以及工件的上下固体表面辐射和对 流热传递均被忽略,也没有考虑蒸发的影响。文献 [8~10]根据流体力学理论和热传导机理建立了小 孔等离子弧焊接熔池流场和热场的三维瞬态数值分 析模型,但都是利用一般的平面高斯热源来描述小 孔等离子弧焊接的热输入。文献 [11] 利用 VOF(流 体体积分数)法建立了小孔等离子弧焊接熔池的二 维瞬态分析模型,也是采用平面高斯热源。平面高 斯热源显然不符合小孔等离子弧焊接的实际情况。 这些研究者没有涉及小孔等离子弧焊接热源作用机 理。小孔等离子弧焊接过程数值模拟的难点在于如 何考虑等离子弧对熔池的"挖掘"作用,如何建立相 应的与小孔有联系的热源模型,尤其是如何考虑小 孔状态下的热输入。文中在这方面进行了初步探 索。为了凸现小孔等离子弧焊接的热源作用机制 作为系列研究的第一步,主要探讨适当的三维体积 热源作用下的焊接热场,对熔池中的流场作用只作 间接考虑。

1 控制方程及边界条件

PAW 焊接过程涉及到热传导、对流、蒸发、辐射 和熔化凝固等众多物理化学过程。为了简化计算, 在三维准稳态模型的建立过程中做出如下假设:① 熔池穿孔之后,焊接熔池和小孔关于焊接中心线对称;②小孔形成后,电弧等离子体沿小孔穿透工件, 把小孔当作体积热源;③通过建立合理的热源模

王怀刚

型,间接考虑熔池中流场和电弧力的作用;④除了材料的导热系数、比热、散热系数与温度有关外,其它 热物性参数(如密度、粘度等)均为常数。

基于以上假设, PAW 焊接热过程控制方程就可 以建立在随热源中心移动的三维直角坐标系中。对 于每一瞬时, 按照固定坐标系进行计算, 其方程为 $\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(k \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(k \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(k \frac{\partial T}{\partial t} \right), \quad (1)$ 式中: ρ 为金属的密度; C_p 为定压比热容; T为温度; t为时间; k为导热系数; x, y, z为三维直角坐标。

方程(1)的定解条件如下:

工件上表面

$$k \nabla T \cdot \mathbf{n}_{t} = q_{a}(r) - q_{cr} - q_{evp}, \qquad (2)$$

$$q_{a}(r) = \frac{q_{IU}}{2\pi r_{0}^{2}} \exp\left(-\frac{r}{2r_{0}^{2}}\right), \qquad (3)$$

$$q_{\rm cr} = \alpha_{\rm cr} (T - T_{\infty}), \qquad (4)$$

 $q_{\rm evp} = m_{\rm er} L_{\rm b}$ (5)

式中: n_i 为上表面的法向单位矢量; $q_a(r)$ 为焊接电 弧传递给工件的热流密度; q_{er} 为因对流和辐射而散 失的热流密度; q_{ep} 为因蒸发而散失的热流密度; η 为电弧热效率; I为焊接电流; U为焊接电弧电压; n_i 为高斯分布参数; r为工件上某点与焊接热源中心 的距离; α_{re} 为对流和辐射边界的综合散热系数, T_{∞} 为环境温度; m_e 为蒸发率: L_i 为蒸发潜热常数。

工件下表面

$$-k \nabla T \cdot \boldsymbol{n}_{\rm b} = -q_{\rm co} \tag{6}$$

$$q_{\rm er} = \alpha_{\rm er} (T - T_{\infty}), \qquad (7)$$

式中: nb 为下表面的法向单位矢量。

对于对称面
$$(x=0): \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$
。 (8)

初始条件:
$$t=0$$
, $T(x, y, z, 0) = T_{\infty}$. (9)

热物性参数导热系数 k 比热 C_p 机综合散热系数 α 的变化如图 1所示。

2 基于三维锥体热源模型的计算结果

利用焊接过程数值模拟软件 SYSW ELD 求解上 述控制方程及定解条件。试件材料为奥氏体不锈钢 1Cr18N i9T; 尺寸为 200 mm×80 mm×9 5 mm,由于 焊接熔池以及小孔关于焊接中心线对称,只计算工 件的一半,将其划分为 14 000个单元,16 968个节 点。

21 三维锥体热源模型

由于小孔等离子弧焊接的能量高度集中并且沿



图 1 随温度变化的热物性参数 Fig 1 Variation of the malmaterial properties with temperature

厚度方向作用,一般常用的高斯、双椭圆等平面热源 模型显然不能适合这种焊接工艺的数值模拟^[12]。 首先用软件中提供的两种体积热源,双椭球体和三 维锥体热源进行模拟,结果表明三维锥体热源(3 – D CHS)比双椭球体热源(DE CHS)更符合等离子弧 焊接工艺的实际情况,如图 2所示。三维锥体热源 是由沿厚度方向上一系列的高斯平面热源沿着厚度 方向叠加而得到,只是在不同的厚度截面上高斯分 布半径不同,如图 3所示。三维锥体热源可用下列 方程描述

$$q_{\rm a}(\mathbf{r} z) = \frac{\eta U}{2\pi r_0^2} \exp(-\frac{r^2}{2r_0^2}), \qquad (10)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0 - v_y t)^2}, \quad (11)$$

$$r_0(z) = r_e - (r_e - r_i) \frac{z_e - z}{z_e - z_i},$$
 (12)

式中: *v_y* 为焊接速度; *x₀*, *y₀* 为热源位置参数; *z_e*, *z_i*为 工件上、下表面的 *z*坐标位置; *r_e*, *r_i*为工件上、下表 面的热源高斯分布半径,这些参数根据经验以及试 验结果确定。

22 改进型三维锥体热源模型

三维锥体热源的实质是在每个沿厚度方向的截 面上,都作用一个高斯分布的平面热源,这些平面高





斯热源沿厚度方向线性衰减。根据试验结果可知, 在小孔等离子弧焊接过程中,小孔形成后熔池的形 状发生很大的变化,不再是倒置锥体形状(图 3),而 是按照一定规律衰减而内陷的倒置锥体形状(图 4)。因此,必须对三维锥体热源进行改进才能更好 地模拟小孔等离子弧焊接过程。

文中提出的改进型三维锥体热源(M3 – D CHS)模型如图 4所示,从上表面到下表面沿厚度方 向上,不同截面上的高斯分布参数 n 按照某种规律 衰减,不再是三维锥体热源的线性衰减,具体由以下 方程描述

$$q_{a}(\mathbf{r} z) = \frac{\eta U}{2\pi r_{0}^{2}} \exp\left(-\frac{r^{2}}{2r_{0}^{2}}\right). \quad (13)$$

$$r = \sqrt{x^{2} + y^{2}} = \sqrt{(x - x_{0})^{2} + (y - y_{0} - v_{y} t)^{2}}. \quad (14)$$

$$r_{0}(z) = \frac{(r_{e} - r_{i}) \times \ln(z)}{h(z_{e}) - \ln(z_{i})} + \frac{r_{i} \times \ln(z_{e}) - r_{e} \times h(z_{i})}{h(z_{e}) - \ln(z_{i})}. \quad (15)$$



图 3 三维锥体热源 Fig 3 3 -D con ica I heat source



图 4 改进型三维锥体热源 Fg 4 M od ifed 3 – D heat source

比较上述两种热源模型,可以看出其主要区别 在于沿厚度方向不同截面上的热源分布参数 n₀ 按 不同规律衰减,也就是三维锥体热源沿厚度方向上 的衰减速度不同。

23 计算结果与分析

小孔等离子弧焊接工艺参数为:焊接电流 *I*=250 A,电弧电压 *U*=31.7 V,焊接速度 v_y=2 mm /s 在这组工艺参数的条件下,试验发现大约经过 4.5 s 焊接过程达到准稳态,小孔形成。文中只计算达到 准稳态时的熔池形状及周围热场。计算过程中分别 用三维锥体热源模型和改进型三维锥体热源模型计 算熔池形状及焊接热场,结果如图 5.6所示。通过 图 5.6的比较可以看出,热源模型对计算结果有重 要影响。



图 5 基于三维锥体热源计算的熔池形状及周围热场

Fig 5 Predicted weld pool geometry and temperature field based on 3 – D conica lheat source





为了更直观地显示不同热源模型的计算结果, 图 2比较了基于三种体积热源模型(双椭球体热 源:三维锥体热源:改进型三维锥体热源)计算出的 焊缝横截面形状与试验结果。从计算结果和实测数 据的吻合程度来说,双椭球体热源模型最差,三维锥 体热源模型次之,改进型三维锥体热源模型的计算 结果得到了改进,但是还有一定的差别。由表 1可 以看出,基于三维锥体热源计算出的正面熔宽与试 验结果相差 0 75 mm, 但是背面熔宽与试验结果相 差 2.14 mm,差别较大。而对于改进型三维锥体热 源,正面和背面熔宽与试验结果差别分别为 1.45 mm和 0 19mm 模拟结果较为理想。但是,由于改 进型三维锥体热源与实际的小孔等离子弧焊接热源 还是有一定的差别,导致熔合线在工件内部的走向 还存在较大的差别。因此,需要建立更为符合实际 的小孔等离子弧焊接热源模型。

表 1 熔宽计算值与试验值的比较

Table 1 Comparison of predicted and experimental weld width

热源模型	正面熔宽 fmm		背面熔宽 hm	
	计算值	试验值	计算值	试验值
三维锥体热源	13. 60	14 35	4 25	2 11
改进型三维锥体热源	12.90	14 35	2 30	2 11

3 小孔等离子弧焊接热源模型

等离子弧焊接时,电弧作用力很大,对焊接熔池 以及小孔的形状有着决定性的影响。小孔等离子弧 焊接过程中,小孔形成后熔池和小孔的形状见图 7 焊缝横断面试验结果见图 8 对该过程进行数值模 拟关键在于建立符合实际过程的热源模型。



图 7 焊接熔池及小孔形状图 Fig.7 Geometry ofwebt pool and keyhole





建立小孔等离子弧焊接热源模型时关键在于如 何考虑和处理电弧作用力。小孔形成后,等离子体 温度很高(15000[°]C),在等离子弧与熔池的界面处 (GL)温度约为2800[°]C。在熔池与固体的界面处 (LS),温度为试件材料的熔点。基于这种情况,文 中建立了一种新颖的小孔等离子弧焊接热源,间接 考虑等离子弧焊接过程中力场和流场的作用,如图 9所示。小孔等离子弧焊接热源模型的热流分布方 程与式(13)~(15)相同。图9中, $f_{\delta}(z)$ 为热源模型 在工件内部的边界,在每个界面上的半径满足式 (15), $f_{1}(z)$ 为等离子弧作用热源与熔池作用热源的 边界,与等离子体的速度和压力有关, $f_{1}(z)$ 直接决 定焊接过程中小孔的尺寸,可以由经验以及焊接试 验结果确定。 $f_{\delta}(z), f_{1}(z)$ 可以由下列方程描述

$$f_{0}(z) = r_{0}(z) = \frac{(r_{e} - r_{i}) \times \mathbf{h}(z)}{\mathbf{h}(z_{e}) - \mathbf{h}(z_{i})} + \frac{r_{i} \times \mathbf{h}(z_{e}) - r_{e} \times \mathbf{h}(z_{i})}{\mathbf{h}(z_{e}) - \mathbf{h}(z_{i})},$$
(16)

$$f_1(z) = \frac{r_e}{\sqrt{H}} \sqrt{z + H - z_o}$$
(17)

式中: H为焊后工件上表面的下塌量。只有位于 $f_0(z)$ 、 $f_1(z)$ 两个界面之间的热源才对焊接工件提供 热量。位于 $f_1(z)$ 以上的工件材料被高温等离子体 加热达到气体状态或排斥开, 在数值计算时可以不 予考虑。采用等离子弧焊接热源模型计算达到准稳态时的熔池形状及其周围热场,计算结果见图 10.



图 9 小孔等离子弧焊接热源示意图 Fig 9 Schematic of heat source in keyhole PAW





由图 10可以看出, PAW 焊缝横截面的计算结 果与试验结果吻合程度良好。正面和背面熔宽分别 为 13 9 mm、2 3 mm、与试验结果分别相差 0 45 mm、0 19 mm。熔合线在焊接工件中的走向也与试 验结果相吻合。该热源模型能够很好地模拟小孔等 离子弧焊接过程的焊接熔池形状以及热场。

4 结 论

(1) 基于 SY SW ELD 软件 平台, 综合考虑了各种因素, 利用有限元方法建立了小孔等离子弧焊接热场的有限元分析模型。

(2)小孔等离子焊接热场的形成是热和力共同作用的结果,数值模拟时必须采用三维体积热源。一般的双椭球体热源和三维锥体热源不能满足要

求。提出的改进型三维锥体热源,能够预测焊缝正 面和背面熔宽,但试件内部熔合线的走向与实际仍 有较大偏差。

(3) 在分析熔池与小孔行为的基础上,建立了 一种新颖的小孔等离子弧焊接热源模型。以该热源 模型为基础,对小孔等离子弧焊接热场进行了有限 元分析。小孔等离子弧焊缝横截面的计算结果与实 测数据吻合良好。

参考文献:

- [1] 董春林, 吴林, 邵亦陈. 穿孔等离子弧焊发展历史与现状
 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(5): 577 581.
- [2] Zhang Y M, Zhang S B. Double sided arc welding increase weld joint penetration [J]. Welding Journal 1998 77 (6): 57s – 61s
- [3] 孙俊生,武传松. PAW + TIC 电弧双面焊接小孔形成过程的 数值模拟[J].金属学报,2003 39(1):79-84
- [4] Zhang Y M, Zhang S B. Observation of the keyhole during p ks m a arcwelding[J]. Welding Journal 1999 78(2): 53s-58s
- [5] 董春林, 吴 林 朱轶峰, 等. 不锈钢等离子弧焊接正面弧
 光传感熔池小孔特征行为的研究 [J]. 等离子加工技术,
 1999, 增刊: 49-52
- [6] Dong Honggang Gao Hongn ing Wu Lin Numerical sin ulation of heat transfer based on phoenics during stationary plasma arc welding process[J]. Transactions of the China Welding Institution 2002, 23(4): 24-26.

董红刚, 高洪明 吴 林. 固定电弧等离子焊接热传导的数 值模拟 [J]. 焊接学报, 2002 23(4): 24-26.

- [7] Russell G, Keanini, Borie Rubinsky. Three dimensional simulation of the plasma arc welding process[J]. Int J Heat Mass Transfer 1993 36(13): 3283 – 3298
- [8] 陈焕明, 熊震宇, 江淑园, 等. 等离子弧穿孔熔池的数值模 拟[J]. 南昌航空工业学院学报, 1999 13(2): 23 - 30.
- [9] Lei Yucheng Zheng Huijin Cheng Xiaonong Simulation of molten pool for vertical keyhole plasma arc welding in alum inum alloy[J]. Transactions of the ChinaWelding Institution 2003 24(1): 44 - 47.

雷玉成,郑惠锦,程晓农.铝合金等离子弧立焊穿孔熔池的 计算机模拟[J],焊接学报,2003 24(1):44-47.

- [10] 郑惠锦. 铝合金穿孔型等离子弧焊接过程模拟[D]. 镇江: 江苏大学. 2002
- [11] Fan H G, Kovacevic R Keyhole formation and collapse in plas ma arcweiding J. J Phys. D. AppJ Phys., 1999, 32, 2902 – 2909.
- [12] WuSu Zhao Haiyan Wang Yu et al A new heat sourcemodel in numerical of high energy beam welding [J]. Transactions of the China Welding Institution 2004 25(1): 91-94
 吴 甦,赵海燕,王 煜,等.高能束焊接数值模拟中的新型热源模型[J].焊接学报,2004 25(1): 91-94

作者简介: 王怀刚, 男, 1980年 4月出生。硕士研究生, 研究方向 PAW 焊接工艺的数值模拟。

Email habey@mail sdu. edu cn

ity monitoring system is created based on fuzzy bgic. This system is use ful in evaluating nugget sizes and proposing possible causes for the variation in nugget sizes. In case of expulsion, the system can also detect the strength of expulsion, the time at which the expulsion occurs, and the possible causes for it

Keywords a lum inum alloy, resistance welding electrum agnetic force evaluation index, quality monitoring of spot welding

Development of a new AgC uZ nSn filler metal for brazing T N i shape memory alloy and stainless steel LIM ing gao, SUN Da qian, Q U X iao ming LUW ei hong (Schoolof Materials Science and Engineering Jilin University Changchun 130025, China), p44 – 48

Abstract A new-type AgCuZnSn filler metal suitable for brazing TN i shape memory allow and stainless steel and applying in birmedicine field has been developed. The melting characteristics microstructure and brazing properties of AgCuZnSn filler metals were investigated and me chanical properties of the joints of TN i shape memory alloy and stainless steel brazed with AgCuZnSn filler metals were evaluated. The results showed that the liquidus and solidus temperatures of the novel Ag51 \sim 53Cu21 ~ 23Zn17 ~ 19Sn7 ~ 9 fillerm etalwere 590. 0 $^{\circ}$ C and 635 3 $^{\circ}$ C, respectively. The filler metal mainly consisted of α-Ag solid solution, α-Cu solid solution and Ag Cu eutectic phase as well as a little Cu₄₁ Sn₁₁, AgZn, Ag₃Sn and Cu₅Zn₈ compounds. The tensile strength of the brazed joint of TN i shape memory alloy and stainless steel using the filler metal reached to 320 ~ 360M Pawhile the loss of shape memory effect and super relasticity of TN i shape memory alloy was low. The developed AgC uZnSn fillerm etal had advantage of low melting point brazing metallurgy char acteristics and interface metallurgy unity and the brazed joint had good te nacity and plasticity.

Keywords Ag based fillermetal melting point microstructure; TN i shape memory alloy stainless steel

Finite elementmethod analysis of temperature field in keyhole plas maarcwelding WANG Huai gang WU Chuan song ZHANG Ming xian(Shandong University Jinan 250061, China). p49 – 53

Abstract The models of both heat source and welding temperature field were developed according to the characteristic of keyhole plasma are welding (K-PAW) process. The result of numerical simulation indicated that neither general double ellipsoid al heat source nor three dimensional conical heat source could precisely describe the thermal process in K-PAW. A modified model of three dimensional conical heat source was put forward. It could be used to calculate the weld width on both the top and the bottom surfaces of the workpiece exactly. But for the fusion line the calculating precision was lower Based on the theoretical analysis of keyhole and weld pool behaviors a novel heat source model was employed which considered the combined action of both heat and force from the plasm a arc Finite element analysis of the temperature fields in K-PAW was conducted and the calculated geometry result of K-PAW weld geometry was in agreement with experimental result

Keywords plasma arc welding keyhole model of heat source tem perature field: finite element analysis

Effect of Nb and Cu metal layer thickness on microstructure and property of SijN₄ Nb /Cu /Ni/Inconeb00 joint YANG M in ZOU Zeng da QU Shi yao WANG Yu fu(School of Materials Science and Engineering Shandong University Jin an 250061 Chin a). p54 – 58

Abstract Partial liquid phase diffusion bonding (PLPDB) of Si_bN₄ to Incone 1600 high temperature alloy was carried out by using the interlayer of Nb /Cu /Ni foil Them ain processing factors had been high lighted for the strength of Si_kN₄ Nb/Cu/Ni/Incone 1600 system. Opti mum parameters had been obtained as bonding temperature 1 403 K bonding time 50 m in and bonding pressure 7. 5 M Pa Effects of Cu and Nbm etal layer on the microstructure and properties of pintwere respec tively investigated by changed thickness of Nb and Cu layer Test results showed that while the thickness of Cu layerwas thinner than 0. 05 mm, the strength of joint increased fast with the increase of Cu layer thickness butwhen the thickness surpassed 0 05 mm, the strength of joint in creased slowly with the increase of Cu layer When the thickness of Nb layer increased the thickness of reaction layer increased but the strength of Si₃N₄ Nb /Cu Ni /h cone 1600 joint increased firstly to amaximum val ue then decreased.

Keywords partial liquid phase diffusion bonding (PLPDB); Si_5N_4 ceramics In cone 600 high temperature alloy interlayer

Scann ing electron beam processing technology based on programma ble control LI Shao qing WANG Xue dong ZHANG Yu xia YAO Shun (Welding Engineering Institute Shanghai Jiaotong University Shanghai 200030 China). p59 – 62 66

Abstract A general vacuum electron beam (EB) machine was e quipped with a control system of electron beam scanning which consisted of two electron beam deflection coik industrial personal computer (IPC), multifunctionalDAQ (data acquisition) card power amplifiers programmable logic controller(PLC), virtual instruments (VI) software LabV EW and so on. The EB scanning track scanning frequency and en ergy density distribution at heating zone could be programmed off line and adjusted on line Brazing experiment of stainless steel capillary tube to plate structure was carried out by means of the system, and the quality of brazed joints met the technical specification of structure D issin ilar albys like niobium and titanium werewelded using the scanning heating mode of dissymmetric heat input. The joint was found that melted niobium amount was as much as titanium, and the weld shapewas almost symmetric D is sin ilar metals that couldn't be welded directly such as Re Timight be