

高能束流小孔焊接模式传热过程的数值模拟*

徐九华 罗玉梅 张靖周

(南京航空航天大学 南京 210016)

提要 以伴随有小孔效应产生的高能量密度束焊接过程为研究对象,建立了运动热源作用下二维小孔焊接中流体流动及传热过程的数学模型,提出采用位置预置-修正的方法对焊接熔池的固、液相交界面位置进行准确捕捉,并对这一小孔焊接模式进行了较为全面的分析,揭示了材料热物理性能、小孔直径、焊接速度等因素对焊接热过程的影响。

关键词 传热, 温度场, 数值模拟, 小孔焊接

1 引 言

当功率密度超过 10^9 W/m^2 的高能束流照射到金属材料表面时,材料将瞬时气化并在束流压力和蒸气压力的共同作用下形成一个细长的柱形小孔,小孔中的气化金属被电离并将射入的能量完全吸收,然后将热量传递给周围材料使其熔化,在小孔周围形成熔化池,如图 1 所示。这种现象常出现在激光束焊、等离子束焊、电子束焊等高能量密度束焊接过程中,并将其统称为小孔焊接。这类焊接能获得极小的熔化区和热影响区并能净化焊缝,从而减少焊缝中存在的诸如内应力、裂纹、气孔等缺陷。因此,高能束流焊接在高精度、高质量焊接领域中正起着越来越重要的作用。

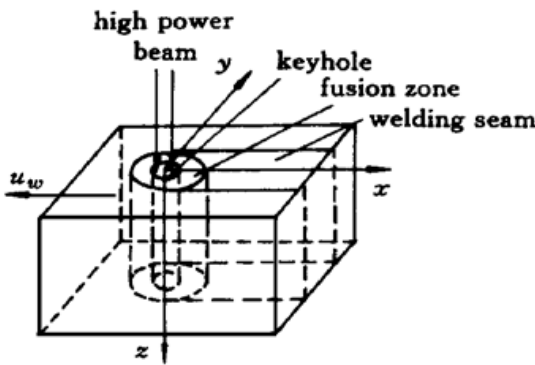


图 1 小孔焊接过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram to illustrate keyhole welding

为了对小孔焊接的熔化区和影响区进行理论分析,藉以对焊接工艺和品质进行改进,必须借助于经典的传热理论。在早期的理论研究中,这类问题被模化为具有移动热源的二维导热问题,仅考虑了热扩散作用^[1,2];随后相变和流动效应被引入到一系列研究之中^[3-5],在这些研究中,固液界面的捕捉是核心问题,Hus 等采用了牛顿-拉伐尔迭代法确定固液界面位置,近年来 Kim 等提出了位置预测-修正法来捕捉固液界面。本文借助于曲线坐标系,运用有限控制容积积分法和固液界面位置预测-修正法对小孔焊接热过程进行数值计

* 国家自然科学基金(编号: 59575069)资助项目。

收稿日期: 1999-05-20; 收到修改稿日期: 1999-09-03

算, 并对影响小孔焊接过程的主要焊接参数进行了分析。

2 数学模型

图 2 给出了小孔焊接过程的物理模型, 采用随热源移动的运动坐标系, 可将传热过程视为稳态。图中 r_a 为小孔半径, r_m 为固液交界面半径, δ_L 和 δ_S 分别表示固相层和液相层厚度。激光小孔焊接传热过程可模化为运动坐标系下的稳态、二维对流换热问题, 其通用控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right] + S(x, y) \quad (1)$$

式中, u, v 为 x 和 y 方向的速度分量; Γ 和 $S(x, y)$ 为变量 ϕ 所对应的扩散系数和源项。对于固相区, 变量 ϕ 为 $T_L, u = u_w, v = 0$, 式(1) 转化为扩散型导热方程。

相应的边界条件为

$$y = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0, v = 0; \quad \frac{\partial T_L}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial T_S}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$r = r_a \quad u_r = 0, \quad \frac{\partial}{\partial r} \left[\frac{u_\theta}{r} \right] = 0, \quad T = T_b (T_b \text{ 为材料沸点温度}) \quad (3)$$

$$r \rightarrow r_\infty \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

$$r = r_m \quad u = u_m, v = 0; \quad T_L = T_S = T_m (T_m \text{ 为材料熔点温度}) \quad (5)$$

一旦固液交界面位置确定, 则可利用式(1) 及相应的边界条件对固、液相的传热控制方程分别进行计算。在固、液交界面上, 还存在一反映局部能量平衡的关系式

$$-\lambda_s \frac{\partial T_S}{\partial n} = -\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial n} + \rho u_w h_{sl} \cos \theta_n \quad (6)$$

式中, h_{sl} 为材料熔化潜热, θ_n 为 x 轴正向和固液交界面法线之间的夹角。

3 计算过程

由于固液相交界面几何形状的不规则性, 导致了计算域的不规则性。为准确地处理曲边界, 本文采用坐标变换法。引入曲线坐标系 $x = x(\zeta, \eta), y = y(\zeta, \eta)$, 通用控制方程式(1) 可以变换为

$$\begin{aligned} \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \zeta}(\rho U \phi) + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta}(\rho V \phi) &= \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\alpha \Gamma}{J} \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right] + \frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\gamma \Gamma}{J} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] - \\ &\quad \frac{1}{J} \left[\frac{\partial}{\partial \zeta} \left[\frac{\beta \Gamma}{J} \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] + \frac{\partial}{\partial \eta} \left[\frac{\beta \Gamma}{J} \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} \right] \right] + S(\zeta, \eta) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $U = uy_\eta - vx_\eta, V = vx_\zeta - uy_\zeta; \alpha = x_\zeta^2 + y_\zeta^2, \beta = x_\zeta x_\eta + y_\zeta y_\eta, \gamma = x_\eta^2 + y_\eta^2, J = x_\zeta y_\eta - y_\zeta x_\eta$ 。

网格生成采用代数法。取固相区计算域 $r_\infty = Cr_m, C$ 取值为 300, 以保证固相区外缘远离温度变化剧烈的液相区。坐标变换采用如下的变换关系式

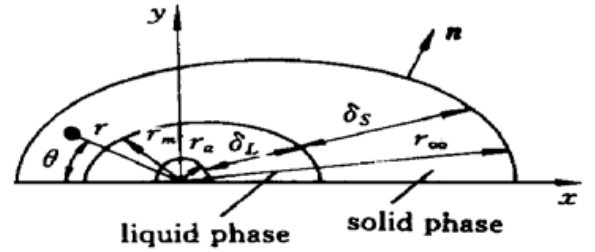


图 2 二维稳态小孔焊接模式
Fig. 2 Two-dimensional steady-state keyhole welding model

$$r = \begin{cases} r_a + \delta_L \zeta & 0 \leq \zeta \leq 1 \\ r_a + \delta_L + \delta_S (\zeta - 1) & 1 \leq \zeta \leq 2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\theta = \eta \quad 0 \leq \eta \leq \pi$$

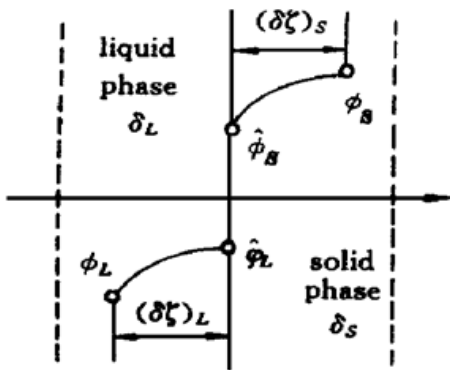


图 3 固液界面上有限控制体示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the control volume near the solid-liquid interface

式中, δ_L 和 δ_S 分别表示固相层和液相层厚度。

计算域总网格数为 140×60 , 其中液相区为 45×60 的均分网格, 固相区为 95×60 , 网格间距呈等差级数递增, 在固液交界面处网格相对密集。

本文采用位置预置-修正法对固液界面进行捕捉。界面位置的修正由界面上局部能量平衡式导出, 固液界面上的有限控制体如图 3 所示。记流入界面和流出界面的热流分别为 q_L^{\wedge} 和 q_S^{\wedge}

$$q_L^{\wedge} = -\lambda_L \frac{\partial T_L}{\partial n} + \rho u_w h_{sl} \cos \theta_n, \quad q_S^{\wedge} = -\lambda_S \frac{\partial T_S}{\partial n} \quad (9)$$

则根据界面上的能量守恒条件, 有

$$q_L^{\wedge} = q_S^{\wedge} \quad (10)$$

对于任一假定的固、液交界面位置, 式(10)一般难以满足, 故需对固、液交界面位置进行修正。记固、液交界面位置修正系数为 ω_m , 则有 $r_m^N = r_m(1 + \omega_m)$ 。

经推导本文采用如下的修正式

$$\omega_m = \frac{q_L^{\wedge} - q_S^{\wedge}}{|q_L^{\wedge}| + |q_S^{\wedge}|} \quad (11)$$

固液交界面的位置修正应能满足: $|\omega_m| \leq 0.001$ 。

4 计算结果与分析

算例 1: 不锈钢(AISI304)

密度 $\rho = 7200 \text{ kg/m}^3$, 熔点 $T_m = 1427^\circ\text{C}$, 沸点 $T_b = 2807^\circ\text{C}$, 粘度 $\mu = 6.42 \times 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$, 潜热 $h_{sl} = 265.2 \text{ kJ/kg}$ 。

图 4 为 $r_a = 2 \text{ mm}$, 不同焊接速度下的熔池界面计算结果, 图 5 为 $u_w = 2.0 \text{ mm/s}$, 不同小孔半径对应的熔池界面形状。从图中可以看出: 当小孔直径一定时, 提高焊接速度有利于获得一个较窄的熔化区, 但随着速度的提高, 熔化区减小的幅度有所降低; 当焊接速度一定时, 小孔直径越小, 所得到的熔化区宽度越窄。

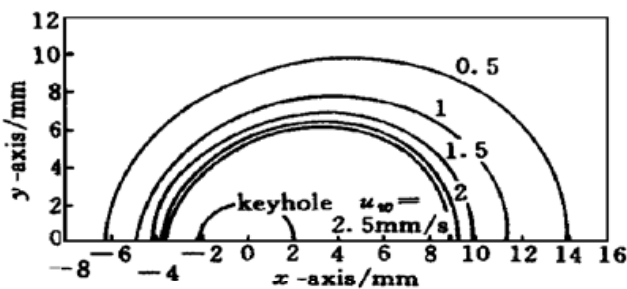


图 4 不同焊接速度下固液界面计算结果

Fig. 4 Solid-liquid interfaces at different welding speeds

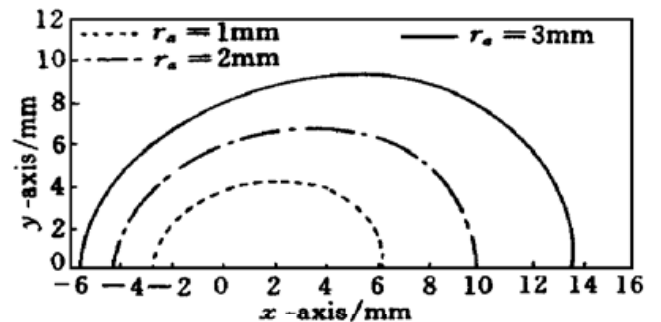


图 5 不同小孔半径时固液界面计算结果

Fig. 5 Solid-liquid interfaces at different keyhole size

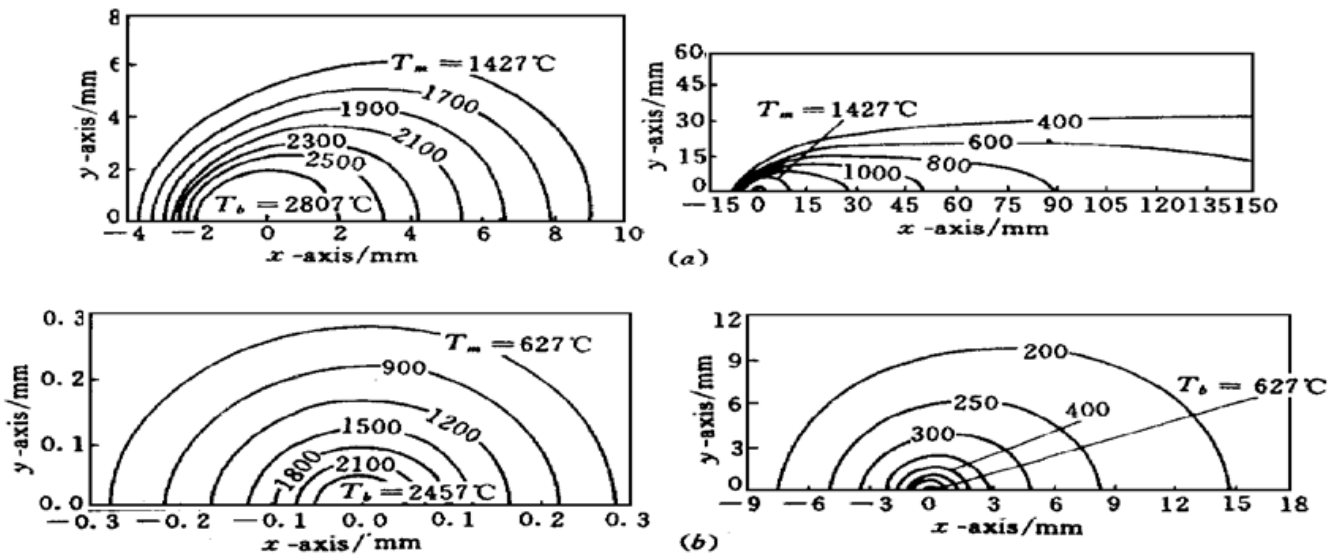


图 6 焊接温度场

左: 液相区; 右: 固相区

Fig. 6 Temperature distribution in welding zone

(a) $u_w = 2.5 \text{ m/s}$; (b) $u_w = 2.0 \text{ m/s}$

left: liquid region; right: solid region

图 6 (a) 为焊接速率 $u_w = 2.5 \text{ mm/s}$, $r_a = 2 \text{ mm}$ 时计算出的不锈钢板小孔焊接的温度分布。显然, 对于本算例, 温度分布的等值线具有椭圆形特征, 并且在热源前端的等温线要比后端的密集, 这与具有移动热源导热的理论分析是一致的。

算例 2: 铝基复合材料(20% SiC_p+ Al6061)

密度 $\rho = 2858 \text{ kg/m}^3$, 熔点 $T_m = 627^\circ\text{C}$, 沸点 $T_b = 2457^\circ\text{C}$, 熔化潜热 $h_{sl} = 395 \text{ kJ/kg}$, 分子粘度 $\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg/(m} \cdot \text{s)}$ 。计算中取 $r_a = 0.05 \text{ mm}$, $u_w = 2.0 \text{ mm/s}$ 。

图 6 (b) 为理论计算所得到的焊接温度场。其椭圆形特征并不明显, 而更接近于圆形。熔池宽度的理论计算值约为 0.55 mm , 与实验值 0.53 mm 十分接近, 如图 7 所示。

由上述算例可以得出: 焊接熔池的几何形状和焊接温度场分布特征是受材料热物理性能、主要焊接过程参数(在本文中主要分析了焊接速度和小孔直径两个参数)综合作用的。对于同样的焊接材料, 焊接熔池和热影响区的大小将随着小孔直径的减小而减小, 随焊接速度的增大而减小。对不同的焊接材料, 它们的热扩散率不同, 扩散传热的能力也不同, 所获得的焊接熔池的形状也不同。

对式(1)进行无量纲分析, 以小孔直径 a 和焊接速度 u_w 作为参考尺寸和速度, 可以得到一个能反映焊接速度、小孔直径、材料热扩散率三者对焊接热过程综合作用的无量纲化参数 P_e , 其定义为

$$P_e = \frac{u_w a}{\alpha} \tag{12}$$

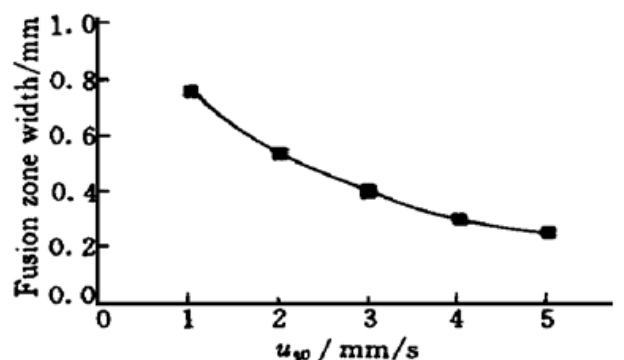


图 7 焊接速度对熔池宽度的影响

Fig. 7 Effect of welding speed on fusion zone width

式中, α 为材料在熔化温度下的热扩散率(m^2/s)。

对于算例 1, $P_e = 0.5237$ (当 $u_w = 1.5 \text{ mm/s}$, $r_a = 2 \text{ mm}$ 时), 而对于算例 2, $P_e = 0.0025$ (当 $u_w = 2.0 \text{ mm/s}$, $r_a = 0.05 \text{ mm}$)。对照两个算例所获得的熔池和等温线形状, 可以说明 P_e 数越大, 熔池和等温线越接近于椭圆形并更为扁平; P_e 数越小, 熔池和等温线的椭圆形特征越不明显, 更接近于圆形。

5 结 论

(1) 建立了运动热源作用下二维高能束流小孔焊接熔池中流体流动及传热过程的数值分析模型, 并在曲线坐标系下, 采用位置预置-修正的方法成功地实现了焊接熔池界面位置的精确捕捉。

(2) 利用本文所建立的数值分析模型对两个不同材料、不同焊接过程参数的焊接热过程进行了数值计算。计算结果表明, 本文的计算方法是合理可行的。

(3) 针对小孔焊接热过程, 探讨了主要焊接过程参数等对焊接熔池形状、焊接温度分布的影响。当小孔直径一定时, 提高焊接速度有利于获得一个较窄的熔化区, 但随着速度的提高, 熔化区减小的幅度有所降低; 当焊接速度一定时, 小孔直径越小, 所得到的熔化区宽度越窄。

(4) 提出了一个可以综合反映焊接材料热物理性能、主要焊接过程参数的无量纲 P_e 数, 并阐明了 P_e 的大小对熔池和等温线的影响。

参 考 文 献

- 1 D. T. Swift-Hook, A. E. F. Gick *et al.*. Penetration welding with lasers. *Welding Journal*, 1973, **52**: 492~ 499
- 2 J. Mazumder, W. M. Steen. Heat transfer model for CW laser material processing. *J. Appl. Phys.*, 1980, **51**: 941~ 947
- 3 M. Davis, P. Kapadia, J. Dowden. Modeling the fluid flow in laser beam welding. *Welding Journal (Research Supplement)*, 1986, Jul.: 167s~ 174s
- 4 Y. F. Hsu, B. Rubinsky. Two-dimensional heat transfer study on the keyhole plasma arc welding process. *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*, 1988, **31**: 1409~ 1421
- 5 Charn-Jung Kim, Shngken Kauh, Sung Tack Ro *et al.*. Parametric of two-dimensional keyhole model for high power density welding processes. *Journal of Heat Transfer*, 1994, **116**: 209~ 214

Numerical Study for Heat Transfer in High Power Density Keyhole Welding Process

Xu Jiuhua Luo Yumei Zhang Jingzhou

(*Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016*)

Abstract A two-dimensional and quasi-stationary numerical model is presented to study the fluid flow and the heat transfer in high power density keyhole welding process. A recently developed method of the position-correction is employed to accurately identify the solid-liquid interface location during welding. A parametric analysis of the existing keyhole model is performed, and the effect of parameters such as material properties, welding speed, keyhole radius on the heat transfer is analyzed during keyhole welding process.

Key words heat transfer, temperature distribution, numerical simulation, keyhole welding