

# 基于旋转 GAUSS 曲面体热源模型的 激光焊接热过程的数值模拟

张瑞华<sup>1</sup>,片山聖二<sup>2</sup>,内藤恭章<sup>2</sup>,樊丁<sup>1</sup>

(1.兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室,甘肃 兰州 730050;

2.大阪大学 接合科学研究所,大阪 567-0047,日本)

**摘要:**利用旋转 GAUSS 曲面体新型热源模型,忽略深熔激光焊时小孔对传热的影响,建立了移动激光热源作用下的三维数学模型。采用 PHOENICS3.4 软件,模拟了 SUS304 不锈钢深熔激光焊接热过程的温度场和熔池熔合线形状,得到了激光深熔焊接时的温度场分布规律和“钉头”状的熔池形状,数值模拟结果与实验结果基本吻合。

**关键词:**激光焊接;旋转 GAUSS 曲面体;PHOENICS

**中图分类号:**TG40

**文献标识码:**A

**文章编号:**1001-2303(2007)05-0051-04

## Numerical simulation of the laser welding by using the Rotary-Gauss body heat source model

ZHANG Rui-hua<sup>1</sup>,SEIJI Katayama<sup>2</sup>,NAITOU Yasuaki<sup>2</sup>,FAN Ding<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-ferrous Metal Materials,Lanzhou University of Technology,Lanzhou 730050,China;2.JWRI,Osaka University,11-1 Mihogaoka,Ibaraki,Osaka 567-0047,Japan)

**Abstract:** A mathematical model to describe moving laser welding was developed by using the Rotary-Gauss body heat source model and neglecting the effect of keyhole on thermal conduct.Numerical simulation was conducted by PHOENICS 3.4 software.The model was applied to laser welding processing of SUS 304 stainless steel.The shape of molten pool and the temperature field were analyzed.The simulation results show that the shape of molten pool looks like“ nailhead” shape.It's provided good agree with the practice welding results.

**Key words:** laser welding; Rotary-Gauss body heat source; PHOENICS

## 0 前言

在激光深熔焊接时,高功率激光辐射金属表面,首先熔化形成熔池,造成表面处的有效加热半径较

大;随着激光束流的继续加热,表面材料强烈汽化,产生金属蒸汽,蒸汽中的起始自由电子通过反韧致辐射吸收激光能量而被加速,直至有足够的能量碰撞电离材料和周围气体,使电子密度雪崩式增长而形成等离子体,进而形成小孔,通过小孔,激光束流沿深度方向对工件进行加热,小孔内部的加热主要靠孔壁上的能量吸收,有效加热半径较小,最后形成钉头焊缝形状<sup>[1]</sup>。在激光焊接的数值模拟中,经常

收稿日期:2006-07-01;修回日期:2007-02-02

基金项目:教育部春晖计划资助项目(Z2004-1-62009);博士点专项基金资助项目(20040731001)

作者简介:张瑞华(1970—),男,甘肃人,博士,主要从事活性化焊接技术和焊接过程数值模拟的研究工作。

采用体热源模型描述焊接热输入过程,如双椭球热源模型<sup>[2]</sup>、Gauss 圆柱热源模型<sup>[3]</sup>和柱状热源模型<sup>[4]</sup>等。虽然采用这些体热源模型能够获得较为准确的模拟结果,但是,利用它们计算出的焊缝(熔池)形状与实际焊接中得到的钉头状焊缝还有很大出入<sup>[5]</sup>。吴

等人为了准确模拟出大深宽比的钉头状高能束熔池(焊缝)形状,提出了新的旋转 Gauss 曲面体热源模型<sup>[6]</sup>。本研究在此热源模型的基础上,用 Phoenix3.4 软件模拟 SUS304 不锈钢激光深熔焊接时熔池的几何形状和温度场的分布。

## 1 数学模型和边界条件

### 1.1 控制方程

假设熔池内的流体为不可压缩牛顿流体;忽略气化热损失;材料物性参数为常数;只考虑准稳态。根据焊接传热机制,焊件的整体温度场与焊接熔池边界向周围焊件传递的热量密切相关,与熔池内部发生的复杂传热现象关系很小,基于此,忽略小孔的影响。基本模型如图 1 所示<sup>[7]</sup>。

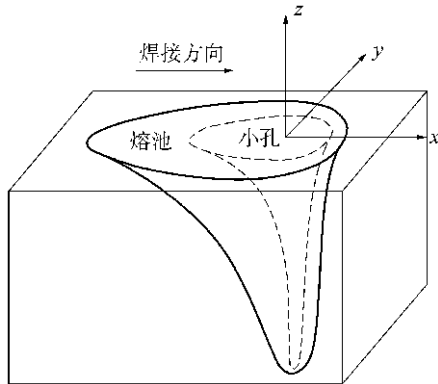


图 1 坐标系和求解区域

Fig.1 Coordinates and solving region

连续方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho u_0 u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial u}{\partial z}) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_x, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho u_0 v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial v}{\partial z}) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_y, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} - \frac{\partial(\rho u_0 w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\mu \frac{\partial w}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\mu \frac{\partial w}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\mu \frac{\partial w}{\partial z}) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_z, \quad (4)$$

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uT) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vT) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho wT) = \frac{\partial}{\partial x}(K \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K \frac{\partial T}{\partial z}) + S_H, \quad (5)$$

式中  $u, v, w$  分别代表流体在  $x, y, z$  方向的速度;  $u_0$  为焊接速度;  $t$  为时间;  $\rho$  为密度;  $K$  为热传导率;  $\mu$  为粘度;  $P$  为压力;  $T$  为温度;  $S_x, S_y, S_z$  分别为动量方程在  $x, y, z$  方向上的源项;  $S_H$  为能量方程的源项。

能量方程的源项  $S_H$  包括相变潜热和非稳态项,对流引起的相变潜热变化和移动热源引起的相变潜热变化<sup>[8]</sup>

$$S_H = -\rho L [\frac{\partial f}{\partial t} + (u-u_0) \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} + w \frac{\partial f}{\partial z}]. \quad (6)$$

式中  $L$  为材料的熔化潜热;  $f$  为液相质量分数。

对于非等温相变,材料的相变存在模糊区,在模糊区中液相质量分数可以根据温度采用如下线性关系表示

$$f = \begin{cases} 0 & T < T_s \\ \frac{T-T_s}{T_L-T_s} & T_s \leq T \leq T_L \\ 1 & T > T_L \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $T_s$  与  $T_L$  分别为熔化开始与终了时的温度。

动量守恒方程中的源项包括 Darcy 项和浮力项<sup>[9]</sup>

$$S_x = A(u-u_0), \quad (8)$$

$$S_y = Av, \quad (9)$$

$$S_z = Aw + \rho g\beta(T-T_0), \quad (10)$$

式中  $A = -C(1-f)^2/(f^3+q)$ , 其中  $C$  是一个大数, 而  $q$  是一个为防止计算过程中发生被零除现象而添加的一个很小的数<sup>[10]</sup>。采用以上的源项处理,在固相区 ( $f=0$ ), 动量方程将总是给出所期望的  $u=u_0, v=0, w=0$  的解; 而在液相区 ( $f=1$ ), 动量方程将化为普通的流体力学方程, 于是固相与液相区可以统一进行求解。

### 1.2 边界条件

#### 1.2.1 上表面

## (1)热边界条件。

选择热源模型的依据是在给定焊接条件下,使模拟所得的熔池边界线与实验所得的焊缝熔合线符合。旋转 Gauss 曲面体是将 Gauss 曲线围绕其对称轴旋转而形成的,如图 2 所示。假设焊接热源能量全分布在此曲面体内部,并满足条件:**a.**模型在  $z$  方向上的截面均为圆,且截面上的热流密度服从 Gauss 分布,在圆心处的热流密度  $q(0,z)$ 达到最大值;**b.**  $z$  轴上各处的热流密度值相同,即  $q(0,z)=\text{const}^{[6]}$ 。

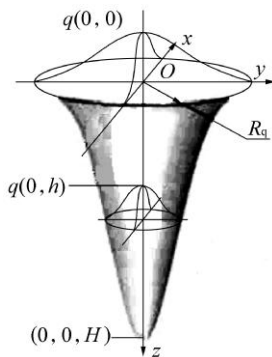


图 2 旋转 Gauss 曲面体热源模型

Fig.2 Rotary Gauss curved surface body heat resource model

具体表达式为

$$q(x,y,z) = \frac{3c_s Q}{\pi H(1-\frac{1}{e^3})} \exp\left[-\frac{3c_s}{\log(\frac{H}{z})}(x^2+y^2)\right], \quad (11)$$

式中  $c_s = \frac{3}{R_0^2}$ ,  $R_0$  为热源开口半径;  $H$  为热源高度;  $Q$  为热源功率。

热损失为对流和辐射散热

$$-K \frac{\partial T}{\partial z} = -h_c(T-T_a) - \sigma \varepsilon \{T^4 - T_a^4\}, \quad (12)$$

式中  $h_c$  为对流系数;  $\sigma$  为 Stefan-Boltzman 常数;  $\varepsilon$  为表面发射率;  $T_a$  为室温。

## (2)表面张力。

在熔池自由表面上,热表面张力与切应力相平衡

$$\begin{aligned} -\mu \frac{\partial u}{\partial z} &= \frac{\partial \gamma}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial x}, \\ -\mu \frac{\partial v}{\partial z} &= \frac{\partial \gamma}{\partial T} \cdot \frac{\partial T}{\partial y}. \end{aligned} \quad (13)$$

## 1.2.2 侧表面和下表面的热边界条件

侧表面和下表面的热边界条件取为工件与环境间的对流与辐射传热条件。

1.2.3  $y$  方向中心对称面的热和流动边界条件

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \quad (15)$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = 0, \quad (16)$$

$$v = 0. \quad (17)$$

## 2 模拟实现

在 Phoenix 前处理系统中建立移动热源焊接过程的物理模型,计算材料为 SUS304 不锈钢。计算选用的焊接参数为:激光功率 2.6 kW,焊接速度 10 mm/s。计算区域 100 mm×25 mm×10 mm。计算材料的物理性能参数与文献[11]相同。采用非均分网格,网格数为 300×40×20,在热源周围将网格加密。首先,在控制方程中确定源项,在 Q1 文件中规定边界条件和源项的位置、变量类型和数值等。其次,在 GROUND 中编制用户子程序,通过 Earth 调用子程序,进行温度场的求解。

## 3 计算结果与讨论

图 3 是计算所得的温度场。由于焊接速度的影响,  $xy$  面的等温线呈椭圆形,形成椭圆形的熔池形状。在移动热源的前方等温线密集,温度梯度较大,热源后方的等温线稀疏,温度梯度较小。在焊缝上表面的激光光源中心的温度最高,最高温度一直延伸到材料的内部,其数值为 2 407 K,与杨立新所得的结果相似<sup>[12]</sup>。在焊缝近表面的温度场较宽,焊缝熔池的形状呈“钉头状”。

试验所用材料是 SUS304 不锈钢。使用的 YAG 激光焊机功率为 2.6 kW。焊接速度 10 mm/s,离焦距为 0 mm,保护气体 Ar,焊完后垂直焊缝切割试样,经过研磨、抛光、腐蚀后观察熔深情况。如图 4b 所示,焊缝形状为钉头状。模拟所得的熔池形状比实际焊接的焊缝形状要浅,这是因为数值模拟时没有考虑小孔中金属等离子体蒸发的反作用力,影响了熔池液态金属的流动造成的。

## 4 结论

建立了基于旋转 GAUSS 曲面体新型热源模型的移动激光热源作用下的三维数学模型,简化了由于小孔引起的复杂热传导过程。利用 PHOENICS3.4 软件,模拟了深熔激光焊接热过程的温度场和熔池熔合线形状,所得的模拟结果更好地反映了深熔激光焊缝的形状特点。可以将该热源模型应用于工程

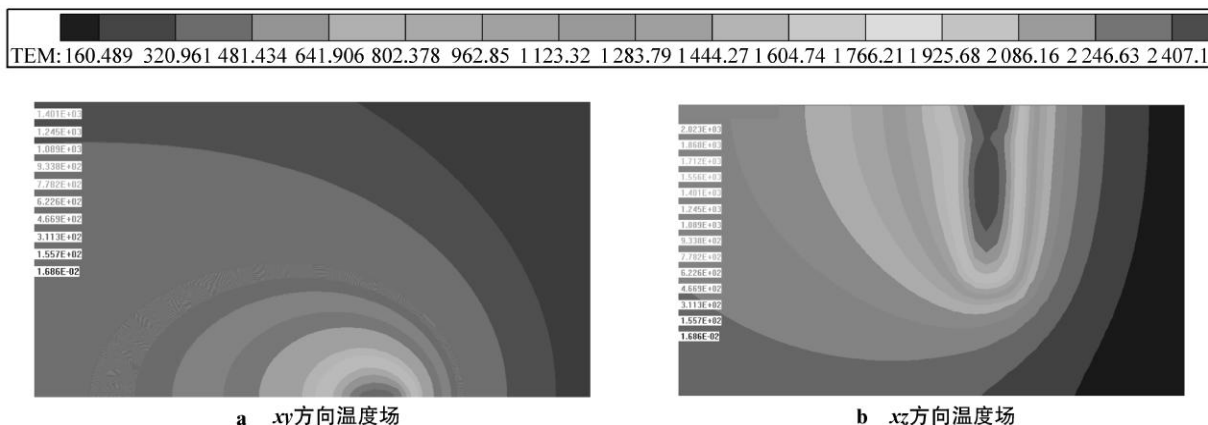


图 3 温度场  
Fig.3 Temperature field

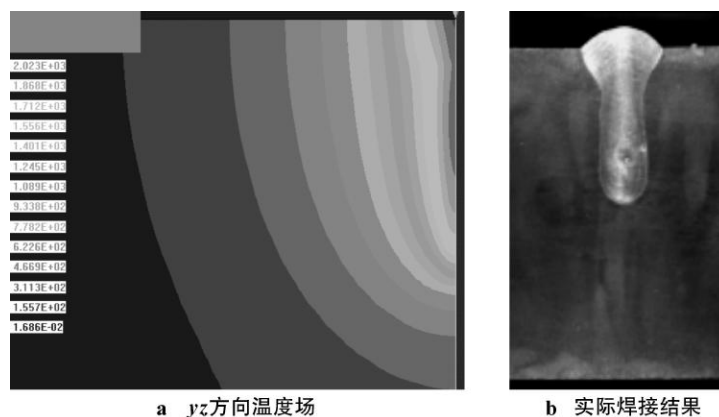


图 4 计算结果与实际焊接结果对比  
Fig.4 Comparison of calculation and practical result

实际,指导生产。

参考文献:

- [1] Wahab M A, Painter. Numerical models of gas metal arc welds using experimentally determined weld pool shapes as the representation of the welding heat source[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1997, 73(2): 153-159.
- [2] Goldak John, Chakravarti Aditya, Bibby Malcolm. New finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B(Process Metallurgy), 1984, 15B(2): 299-305.
- [3] Chang W S, Na S J. A study on the prediction of the laser weld shape with varying heat source equations and the thermal distortion of a small structure in micro-joining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120(1-3): 208-210.
- [4] Carnignani C, Mares R, Toselli G. Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a single pass butt-welded thick steel plate[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 179(3): 197-210.
- [5] 刘顺洪, 万鹏腾, 胡良果, 等. 激光焊温度场研究进展和展望[J]. 中国机械工程, 2001, 12(4): 478-480.
- [6] 吴, 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.
- [7] Kim III-Soo, Jung Young-Jac, Son Joon-Sik. Finite element modeling of GMA welding processes[J]. The Phoenix Journal, 2000, 13(1): 56-69.
- [8] Choo R T C. Mathematical modeling of heat and fluid flow phenomena in a mutually coupled welding arc and weld pool[D]. London: Cambridge, 1991.
- [9] Massoud Goodarzi. Mathematical modeling of gas tungsten arc welding(GTAW) and gas metal arc welding(GMAW) processes[D]. Toronto: University of Toronto, 1997.
- [10] Kim I S. Numerical and experimental analysis for the GMAW Process[D]. Australia: University of Wollongong, 1996.
- [11] De A, Debroy T. Improving reliability of heat and fluid flow calculation during conduction mode laser spot welding by multivariable optimization[J]. Science and technology of welding and joining, 2006, 11(2): 143-152.
- [12] 杨立新, 彭晓峰. 固体表面激光加工熔池特性的数值分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9(2-3): 215-221.