

10 387-390

移动热源条件下熔池内流体流动和传热问题的数值研究 *

邹德宁 雷永平 黄延禄 苏俊义

(西安交通大学机械工程学院, 西安 710049)

TG156-99
TK124

摘 要 对有移动热源的表面重熔问题, 在固定坐标系内, 采用固定网格、焓-孔隙度法处理相变, 并将移动热源引起的能量、动量方程的变化作为附加源项构建控制方程组, 使用控制容积积分法对其进行求解, 数值模拟了激光扫描条件下熔池内传热、相变及流体流动的情况; 利用所开发的软件对同一扫描速度、不同激光输入功率条件下不锈钢材料熔化与凝固过程中温度场、速度场进行了比较与分析。

关键词 表面重熔, 移动热源, 相变, 传热, 流体流动

中图分类号 TG221

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)04-0387-04

NUMERICAL ANALYSIS OF FLUID FLOW AND HEAT TRANSFER IN MELTED POOL WITH A MOVING HEAT SOURCE

ZOU Dening, LEI Yongping, HUANG Yanlu, SU Junyi

College of Mechanical and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Correspondent: ZOU Dening, associate professor, Tel: (029)2201074, Fax: (029)2202923,

E-mail: ylhyl@263.net

Manuscript received 1999-12-08, in revised form 2000-01-03

ABSTRACT In a reference frame attached to the moving heat source, for example, surface remelting, a fixed grid enthalpy-porosity method was used to deal with phase change problem, and the momentum and energy changes caused by moving heat source were taken as additional sources to formulate control equations which are discretized and solved using control-volume-based computational method. Heat transfer, phase change and fluid flow in melted pool could be simulated. With the developed software, the temperature and velocity fields of stainless steel for different laser input powers and same scanning velocity during laser remelting have been calculated and analyzed.

KEY WORDS surface remelting, moving heat source, phase change, heat transfer, fluid flow

定点激光热源作用下熔池内传热及流体流动问题已有人进行了研究, 对连续性方程、动量及能量方程求解也取得了相当多的经验^[1,2]。但在实际工作中, 激光热源总是以恒定的速度对被加工试样进行扫描, 或试样以恒定速度相对静止激光源运动, 因此研究有移动热源的激光表面重熔问题更具有实际意义。在固定坐标系内建立相应的控制方程, 对传热、相变、流动问题的研究也有报道^[3,4]。但要准确模拟求解出移动热源及热流随时间在空间位置及分布的变化, 需要计算区域的剖分网格数非常大, 计算

时间步长取得非常小, 造成计算机占用内存大, 计算时间长, 为数值模拟工作带来困难。

本文在前人研究的基础上, 采用改进的计算方法, 在附有移动热源的坐标系内建立相应的连续性、动量、能量方程组; 热源相对移动引起的能量和动量方程变化, 分别作为能量和动量方程的附加源项进行处理; 相变问题选用固定网格、焓-孔隙度方法加以解决; 建立单相统一的控制方程, 采用控制容积积分法对其进行离散、求解; 结合给定不锈钢材料, 对同一扫描速度、两种不同激光输入功率条件下, 熔池内传热、相变及流体流动问题进行了比较与分析。

1 物理模型

图 1 为静止激光源与在 x 方向上以速度 U_t 运动的工件相互作用示意图。如图所示, 激光光源对以 U_t 速度运动

* 国家自然科学基金资助项目 59871038, 西安交通大学科研基金及华中理工大学激光技术国家重点实验室基金资助项目

收到初稿日期: 1999-12-08, 收到修改稿日期: 2000-01-03

作者简介: 邹德宁, 女, 1964 年生, 副教授, 博士生

的工件进行扫描,光源功率恒定,热流分布假定按 Gaussian 分布,被加热工件对激光吸收率取 0.2,吸收的热量使工件熔化产生熔池,因温度梯度导致表面张力变化,在自由表面上表面张力梯度引起熔池内流体进行流动。

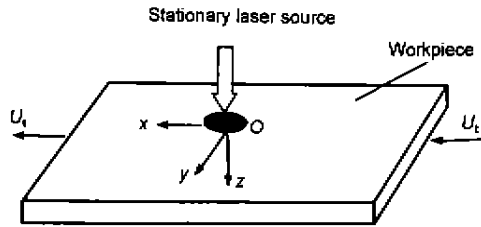


图 1 激光表面重熔示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser surface remelting

本文主要研究了: (1) 激光光源的热量如何传输给金属材料表面; (2) 传导和对流传热的耦合求解; (3) 熔池内流体的流动; (4) 固液界面发生的相变(熔化和凝固); (5) 熔化区域的几何形状; (6) 加工试样与外界的对流与辐射换热; (7) 金属材料物性参数的准确性等。

采用数学模型时假设: 熔池的自由表面为平面; 熔池内流体流动按层流处理; 浮力项处理方法采用 Boussinesq 假定,除浮力项外所有项中的密度认为恒定,浮力项中密度随温度呈线性变化。

2 数学模型的建立

在固定坐标系内,三维非稳态通用控制方程组^[5]为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \frac{\partial}{\partial x'}(\rho u'\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) = \frac{\partial}{\partial x'}(\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial x'}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_\phi \quad (1)$$

式中, Φ 为控制变量; u' , v 和 w 分别为 x' , y 和 z 方向的速度; ρ 为密度; $\Phi=1$, x' , y , z 及 h 分别表示连续性方程 x' , y , z 方向的动量方程及能量方程; h 为显热; Γ_ϕ 为扩散系数; S_ϕ 为源项; p 为压力,连续性方程和能量方程中均无压力梯度项,采取坐标变换方法将下式

$$x = x' - U_t t \quad (2)$$

代入式(1),去掉非稳态项,整理得

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u\Phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v\Phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma_\phi \frac{\partial \Phi}{\partial z}) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_\phi + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U_t \Phi) \quad (3)$$

式中, x , y 和 z 为附有激光热源的坐标系的坐标,再用不同的变量分别代入式(3),可得到三维稳态控制方程组。激光对以恒定速度运动的工件扫描时,由于熔池尺寸远小

于工件,故扫描开始一段时间后熔池内的传热和流动即可达到相对稳定状态,因此控制方程中忽略非稳态项。

2.1 动量方程及源项的处理

三维稳态动量方程组可用通式表示为

$$\nabla \cdot (\rho v v_i) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_v \quad (4)$$

式中,除对流项、扩散项及压力梯度项外,其余为源项。热源相对移动引起的对流项变化也可作为附加源项处理。式中, v 为速度矢量; v_i 为 x , y , z 三个方向的速度矢量。

动量方程的源项 S_v 包括有浮力项、Darcy 项及热源相对移动引起的附加对流项。

浮力项

$$S_b = \rho g \beta (\theta - \theta_{ref})$$

Darcy 项

$$S_{e-p} = -A v_i$$

$$A = C \frac{(1-f_1)^2}{(f_1^3 + B)}$$

式中,系数 A 由 Carman-Kozeny 方程确定; f_1 为液相分数;系数 B 为非常小的正整数,避免分母为零。

移动热源引起的附加对流项为

$$S_{adv} = \nabla \cdot (\rho U_t v)$$

2.2 能量方程及源项的处理

能量方程变量用显热 h 表示, h 由固相显热和液相显热两部分组成,显热 h 和相变潜热 ΔH 之和为混合焓 H 。三维稳态能量方程的矢量表达式如下

$$\nabla \cdot (\rho v h) = \nabla \cdot \left(\frac{\kappa}{c_p} \nabla h \right) + S_h$$

能量方程中除扩散、对流项外,其余均为源项。能量方程的源项 S_h 包括对流(不包括移动热源的运动)引起的相变潜热变化和移动热源运动引起的相变潜热变化及移动热源引起的显热变化, S_h 可表示为

$$S_h = [\nabla \cdot (\rho v \Delta H) + \nabla \cdot (\rho U_t \Delta H)] + \nabla \cdot (\rho U_t h) \quad (5)$$

2.3 数值模拟程序的实现

本文研制的模拟程序是在计算传热及流体流动的 PHOENICS 软件上二次开发完成的。网格剖分、几何形状确定和简单边界条件的输入及求解方法的选择是通过填写软件包中的 Q1 控制卡,源项及其复杂边界条件的实现通过在接口模块 GROUND 中建立子模块完成。

3 数值计算

3.1 计算条件

结合图 1 所示的物理模型,对给定的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢试样进行激光表面重熔,激光功率分别为 3 和 4 kW,

激光能量按 Gaussian 分布, 假定不锈钢材料对激光能量的吸收系数为 0.2, 激光扫描速度为 5 mm/s, 计算过程中材料的热物性值及其它参数主要有: 热膨胀系数 $\beta=10^{-4}$, 密度 $\rho=7200 \text{ kg/m}^3$, 液、固相导热系数 κ_l, κ_s 均为 $25.1 \text{ W/(m}\cdot\text{C)}$, 液、固相温度 (θ_l, θ_s) 分别为 1512 和 1472 C, 熔化潜热 $L=395 \text{ kJ/kg}$, 液、固相比热容 $c_{p,l}, c_{p,s}$ 分别为 807 和 $702 \text{ J/(kg}\cdot\text{C)}$, 动力粘度 $\mu=3.0\times 10^{-2} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$. 选取同热源有效半径相比无限大的试样, 由于沿 x 方向扫描时, 以 y 方向中心线为对称, 故温度场和速度场计算区域只取 y 方向中心线一侧, 计算区域 x 方向取为 20 mm, y 和 z 方向均为 5 mm. 采用均匀剖分网格, x, y 和 z 方向网格剖分数为 $71\times 36\times 34$.

3.2 边界条件

顶表面 ($z=0$), 假定自由表面为平面的条件下

$$-q'(r) + \alpha(\theta - \theta_a) + \delta e[\theta + 273.16]^4 - (\theta_a + 273.16)^4] = k(\partial\theta/\partial z)$$

$$q'(r) = (3Q/\pi a^2 \exp)(-3r^2/a^2) \quad r \leq a$$

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \gamma}{\partial \theta}$$

$$\mu \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial \gamma}{\partial \theta}$$

式中, Q 为激光输入功率; 激光热源的有效半径 a 为 $2\times 10^{-3} \text{ cm}$; α 为试样与外界的换热系数, $\alpha=20 \text{ W/(m}^2\cdot\text{C)}$; 环境温度 $\theta_a=25 \text{ C}$; γ 是金属材料的表面张力; 发射率 $e=0.4$; δ 是 Stefan-Boltzmann 常数. 计算区域的其余各面, 按照加工过程的特点, 分别对温度及速度选取适当的边界条件 (此处省略).

3.3 计算方法

本研究采用对流 / 扩散固液相变单相统一模型, 利用固定网格、熔 - 孔隙度方法以较好解决熔化凝固过程中固、液相及固、液两相糊状区的统一问题; 计算中采用控制容积积分法离散控制方法, 采用交错网格技术, 使速度控制容积的节点位于主控制容积的界面上, 以抑制压力波动, 保证流体流动数值计算的稳定性; 速度压力耦合采用 SIMPLE 算法; 源项中的对流项用迎风差分进行离散; 每一变量离散方程自身的求解也采用了迭代法.

3.4 计算结果

对给定的不锈钢材料, 分别以 3, 4 kW 激光输入功率、5 mm/s 扫描速度进行重熔处理, 表面张力温度系数取为 $-3.0\times 10^{-3} \text{ kg/(s}^2\cdot\text{C)}$, 计算的温度场见图 2. 从图可以看出, 其它条件相同时, 激光输入功率大小对工件温度场有显著影响.

图 3 反映了过坐标原点 O 的 yOx 和 xOz 截面上熔池形状轮廓线和流体流动速度的大小和方向. 由图可知, 相同扫描速度、不同输入功率的条件下, 熔池的固、液相线变化规律相近, 流体流动规律及方向也相近, 但 4 kW 输入功率辐照产生的热影响区更大, 其无论在 xOy 面还是 xOz 面上, 沿 x, y 和 z 方向上热影响区的长、宽和高都较 3 kW 条件下为大. 在 xOz 截面上, 功率为 4 kW 时熔池宽深比为 4.137, 大于功率为 3 kW 时相同面上熔池的宽深比 3.281; 在 yOx 截面上, 4 kW 功率时熔池自由表面 y, x 方向上熔池径向比为 0.88 大于 3 kW 功率时相同面上的熔池径向比 0.61. 由速度场的计算结果可知: 激光热源输入功率高时, 熔池表面产生相对较大的

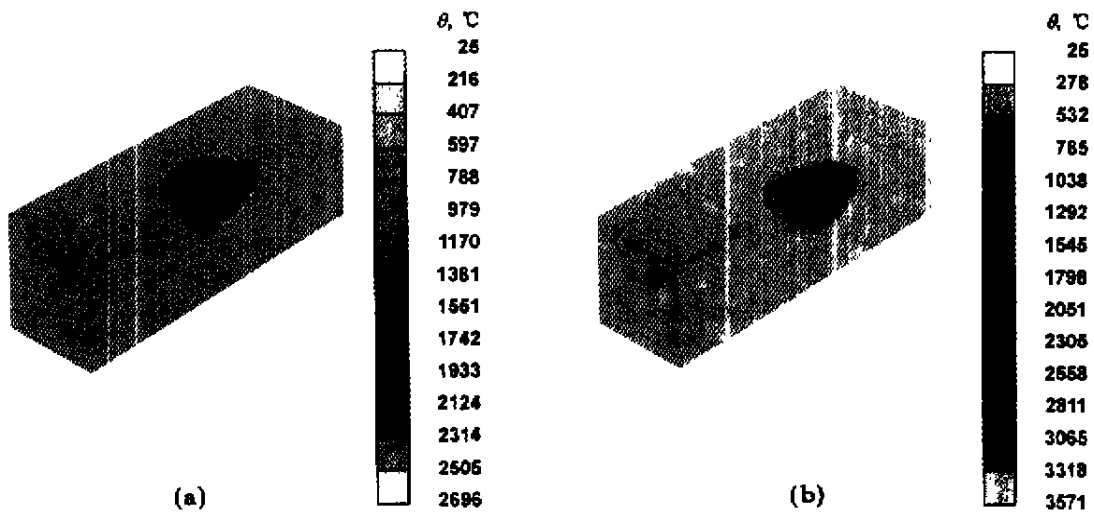


图 2 同一扫描速度、不同激光输入功率条件下计算得到的三维温度场

Fig.2 Calculated three-dimensional temperature fields under the scanning velocity of 5 mm/s and different laser input powers

(a) $Q=3 \text{ kW}$ (b) $Q=4 \text{ kW}$

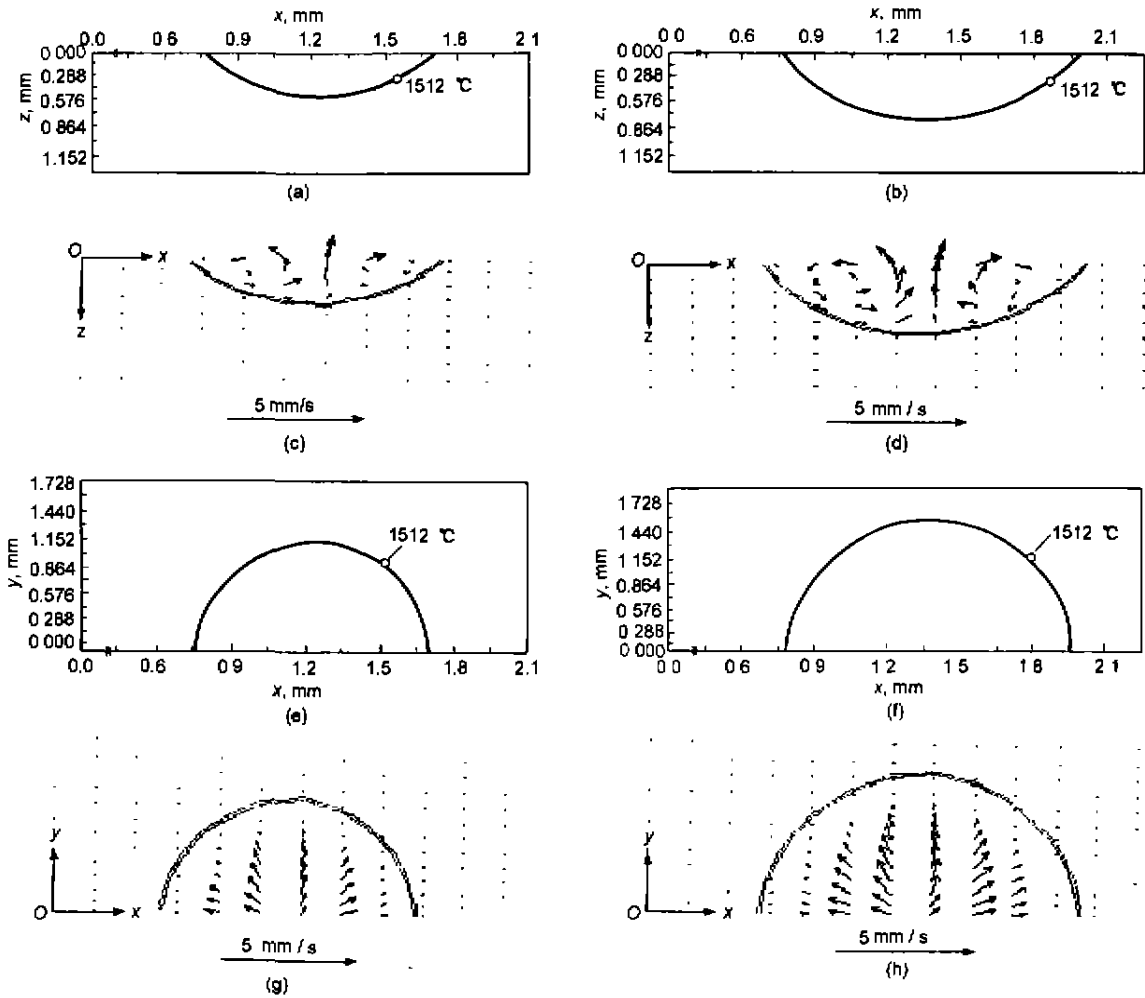


图3 同一扫描速度、不同激光输入功率条件下 xOz 和 yOz 截面上熔池形状和计算的速度场

Fig.3 Calculated velocity fields and the shape of fusion zones under the scanning velocity of 5 mm/s and different laser input powers on xOz section (a—d) and yOz section (e—h)

(a),(c),(e),(g) $Q=3$ kW (b),(d),(f),(h) $Q=4$ kW

温度梯度，温度梯度引起的表面张力驱使熔池内流体流动更为激烈。

4 结论

本文开发和研制了移动热源条件下激光表面重熔过程温度场和速度场的数值模拟软件。

(1) 利用固定网格、熔-孔隙度法的单相统一模型较好解决了表面重熔过程中熔化与凝固过程的两相问题。

(2) 对移动热源引起的动量和能量变化分别作为动量和能量方程的附加源项加以处理。

(3) 通过控制激光输入功率 Q 及扫描速度 U_t 等激光

工艺参数，可以改变熔池的几何形状及熔池内流体流动的情况。

参考文献

- [1] Kou S, Sun D K. *Metall Trans*, 1985; 16A: 203
- [2] Paul A, Debroy T. *Metall Trans*, 1988; 19B: 851
- [3] Zacharia T, David S A, Vitek J M, Debroy T. *Metall Trans*, 1990; 21B: 600
- [4] Chan C, Mazumder J, Chen M M. *Metall Trans*, 1987; 15A: 2690
- [5] Tao W Q. *Numerical Heat Transfer*. Xi'an: Published by Xi'an Jiaotong University, 1988: 231
(陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 231)