

文章编号: 0258-7025(2001)01-0081-04

激光表面重熔过程中流体流动和 传热的数值模拟^{*}

邹德宁 雷永平 苏俊义

(西安交通大学 西安 710049)

摘要 在 PHOENICS 软件基础上开发了模拟激光表面重熔过程温度场和速度场的数值程序,温度场和速度场的计算采用了固定网格及处理熔化和凝固问题的一般源项方法,移动热源引起的能量和动量变化分别作为附加源项构建控制方程组,采用控制容积积分法对控制方程进行离散和求解,对铝合金激光表面重熔过程中的传热、相变及流体流动问题进行了三维非稳态的数值模拟研究。

关键词 激光重熔,移动热源,传热,流动

中图分类号: TG 665; O 242.1 文献标识码: A

Numerical Simulation on Heat Transfer and Fluid Flow Phenomena in Laser Surface Remelting Process

ZOU De-ning LEI Yong-ping SU Jun-yi

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract The software used to simulate temperature and velocity fields in laser surface remelting process is developed on the basis of PHOENICS code. Computational methods, which include a fixed-grid and general source term based on dealing with melting and solidification, are employed. Momentum and energy changes caused by moving heat source are taken as additional sources in controlled-equations, and the equations are discretized and solved using a control-volume-based method. By using the software, numerical calculation on heat transfer, phase change and fluid flow in laser remelting process of an aluminum alloy specimen are carried out.

Key words laser remelting, moving heat source, heat transfer, fluid flow

1 引 言

在激光表面重熔过程中激光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。激光束扫过金属表面时,温度升高并熔化而产生熔池,光束移去后熔区将快速凝固,组织会发生强烈细化并可生成大量介稳相和非平衡组织,使激光熔区获得优异的力学性能,特别是耐磨性和耐蚀性。激光表面重熔时,除了传热和相变外,熔池中还存在对流现象,研究这些现象并掌握其规律,对应用激光表面重熔技术获得既保持

基体金属原有力学性能又获得表面特殊性能的产品来说尤为重要。

在固定坐标系内,将移动热源作为能量方程的边界条件建立相应的控制方程,对传热、相变、流动问题的研究已有报道^[1-3]。但要准确计算出温度分布随时间的变化,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,在考虑移动热源的固定坐标系内建立相应的连续性、动量、能量方程组,将热源移动引起的能量和动量变化,分别作为能量和动量方程的附加源项进行处理,相变问题用一般源项方法加以解决;建立单相统一的控制方程,采用控制容积积分法对方程及其源项进行离散、求解;对一定的激光扫描参数下

^{*} 国家自然科学基金(基金号为 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资助项目。

铝合金表面重熔问题进行了数值计算,得到了该条件下熔池中的温度场和速度场,并将计算结果与前人所做实验进行了比较。

2 数学模型的建立

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的示意图。如图所示,光源对工件进行扫描,光源功率恒定,被工件吸收的激光热量使工件熔化产生熔池。熔池自由表面上的温度变化造成表面张力梯度,驱使液态金属从低表面张力处流向高表面张力处,引起熔池内流体流动,从而使熔池形状、温度场和速度场均发生变化。对此问题建立数学模型时,采用V. R. Voller^[4]等提出的一般源项法,该法处理相变问题时不需显式跟踪相变前沿的位置变化,也不需求解运动的边界问题,通过选择合适的变量建立标准的对流扩散单相统一模型,不能归入标准控制方程的项均按源项对待。该方法可以直接采用求解流体流动和传热的标准算法,通过对源项加以处理编制相应的子程序与通用软件(如PHOENICS软件)相结合即可对所讨论的问题进行求解。对文中采用的数学模型需做如下几点假设:(1)熔化的自由表面为平面;(2)熔池内流体流动按层流处理;(3)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。

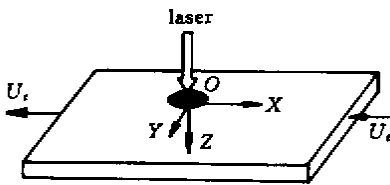


图1 激光表面重熔问题示意图

Fig. 1 Sketch of the laser surface remelting

采用的三维非稳态控制方程组为:

$$\text{连续性方程} \quad \frac{\partial(\rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V u) = \nabla(\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V v) = \nabla(\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V w) = \nabla(\mu \nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_z \quad (4)$$

能量方程

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V h) = \nabla \left(\frac{k}{c} \nabla h \right) + S_h \quad (5)$$

方程组中 ρ, μ, k, c 分别表示密度、动力粘度、导热系数和比热, V 及 u, v, w 分别表示速度矢量和 x, y, z 方向的速度, h 表示显焓, p 表示压力, S_x, S_y, S_z, S_h 分别表示 x, y, z 方向动量方程的源项及能量方程的源项。

3 控制方程中源项及边界条件的处理

由上述控制方程组可知,式中除非稳态项、对流项、扩散项及压力梯度项外,其余为源项,热源移动引起的对流项可作为附加源项处理。

3.1 动量方程源项的处理

动量方程源项包括有浮力项、达西项^[5]及热源移动引起的附加对流项。

$$S_x = - \left[\frac{\alpha(1-f_l)\gamma}{f_l + B} \right] u + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U_t u) \quad (6)$$

$$S_y = - \left[\frac{\alpha(1-f_l)\gamma}{f_l + B} \right] v + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U_t v) \quad (7)$$

$$S_z = - \left[\frac{\alpha(1-f_l)\gamma}{f_l + B} \right] w + \rho g \beta (T - T_{\text{ref}}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U_t w) \quad (8)$$

式中 C 由Carman-Kozeny方程确定, B 是非常小的正整数,以避免分母为零。

3.2 能量方程源项的处理

能量方程(6)中显焓 h 和相变潜热 ΔH 之和为材料的混合焓

$$h = (1-f_l)c_s T + f_l c_l T \quad (9)$$

$$\Delta H = L \quad T > T_l$$

$$\Delta H = f_l L \quad T_l \geq T \geq T_s \quad (10)$$

$$\Delta H = 0 \quad T < T_s$$

显焓 h 由固相显焓和液相显焓两部分组成,能量方程源项 S_h 包括相变潜热随时间变化项、对流(不包括移动热源的移动)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焓的变化。 S_h 可表示为

$$S_h = \frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta H) + \nabla \cdot (\rho V \Delta H) + \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho U_t \Delta H) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho U_t h) \right] \quad (11)$$

3.3 边界条件

顶表面($Z=0$)上,激光能量输入按高斯分布

$$-q'(r) + h(T - T_a) + \sigma \epsilon [(T + 273.16)^4 - (T_a + 273.16)^4] = k \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (12)$$

$$q'(r) = \frac{3Q}{\pi a^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{a^2}\right) \quad r \leq a \quad (13)$$

对平的自由表面,动量方程中的边界条件

$$\begin{aligned} \mu \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial \gamma}{\partial T} \\ \mu \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial \gamma}{\partial T} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, r 为激光热源的有效半径,为0.3 mm, α 为试样与外界的换热系数,取 $100 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$,环境温度 T_a 为 25°C , γ 为金属材料的表面张力, e 为发射率, σ 为 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)。

3.4 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 Q_1 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。

4 数值计算

4.1 计算条件

结合图 1 所示的物理模型,对 LD31 铝合金试样进行激光表面重熔,激光功率为 1.3 kW,激光能量按高斯分布,假定处理过的铝合金材料对激光的吸收系数为 0.14,激光扫描速度为 4.23 mm/s,表面张力温度系数取为 $-3.0\text{E-}4 \text{ kg/s}^2\text{ }^\circ\text{C}$,计算过程中其他参数和材料的热物性值见表 1。沿 x 方向扫描时,以 y 方向中心线对称选取一侧为计算区域,区域尺寸为 $6 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$,在 x, y, z 方向上剖分网格数分别为 $60 \times 40 \times 50$ 。

4.2 计算方法

本研究根据对流/扩散固液相变单相统一模型,采用固定网格的一般源项法,统一处理熔化凝固过程中固、液相及固液两相糊状区中的问题,计算中采用控制容积积分法离散控制方程,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,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,每一时间步长的循环中,包含着许多层临时性系数下的迭代,

对各变量方程之间进行耦合求解,每一变量离散方程自身的求解也采用了迭代法,一个时间步长内扫描 25 次,速度和温度迭代次数均为 50 次,每一时间步长扫描结束后温度和速度变量的总残差分别小于 10^{-2}°C 和 10^{-7} m/s ,较好地保证了了解的收敛。

表 1 计算中所用到的热物性参数

Table 1 Physical properties used for calculation

Thermal coefficient of expansion	$\beta = 1.0 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Density	$\rho = 2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
Emissivity	$e = 0.4$
Reference temperature	$T_r = 652^\circ\text{C}$
Liquid heat conductivity	$k_l = 168 \text{ W/m}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$
Solid heat conductivity	$k_s = 108 \text{ W/m}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$
Liquid temperature	$T_L = 652^\circ\text{C}$
Solid temperature	$T_S = 582^\circ\text{C}$
Latent heat	$L = 395000 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$
Specific heat	$c = 1066 \text{ J/kg}\cdot\text{ }^\circ\text{C}$
Viscosity	$\mu = 1.0 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

4.3 计算结果

图 2 为表面重熔过程达到稳定状态时通过 o 点的 xy, xz 和 yz 截面上激光熔池内速度场和温度场的计算结果。

图 2(a1)(b1)是在 x 方向距 o 点 3 mm 处(第 30 个剖分网格) yz 截面上的温度及速度分布,因光源位置选定在 o 点上方,故选取过 o 点的 yz 截面主要是为更直观地显示计算结果,计算熔池表面的最高温度约为 1911°C ,图 2(a2)(b2)为从顶部观察到的温度场和速度场,由表面张力梯度引起的流体流动速度场形状与 Heiple^[6]等实验所观察到的结果相一致;图 2(a3)(b3)是通过 o 点的 xz 面上的温度场和速度场。将计算激光熔池最大熔深和熔池宽度同 S. Kou 和 Y. H. Wang^[2]等在 1986 年与本文研究相同条件下对 6063 铝合金(相当于 LD31)激光表面重熔所测熔池深度和宽度值进行比较,误差分别在 6.06% 和 10.34% 范围之内,两者大体相符。

5 结论

(1) 利用本文二次开发的软件模拟了激光表面重熔过程中温度场和速度场,计算得到的熔池最大深度和宽度与前人实验测定值大体相符。

(2) 利用固定网格、一般源项法的单相统一模

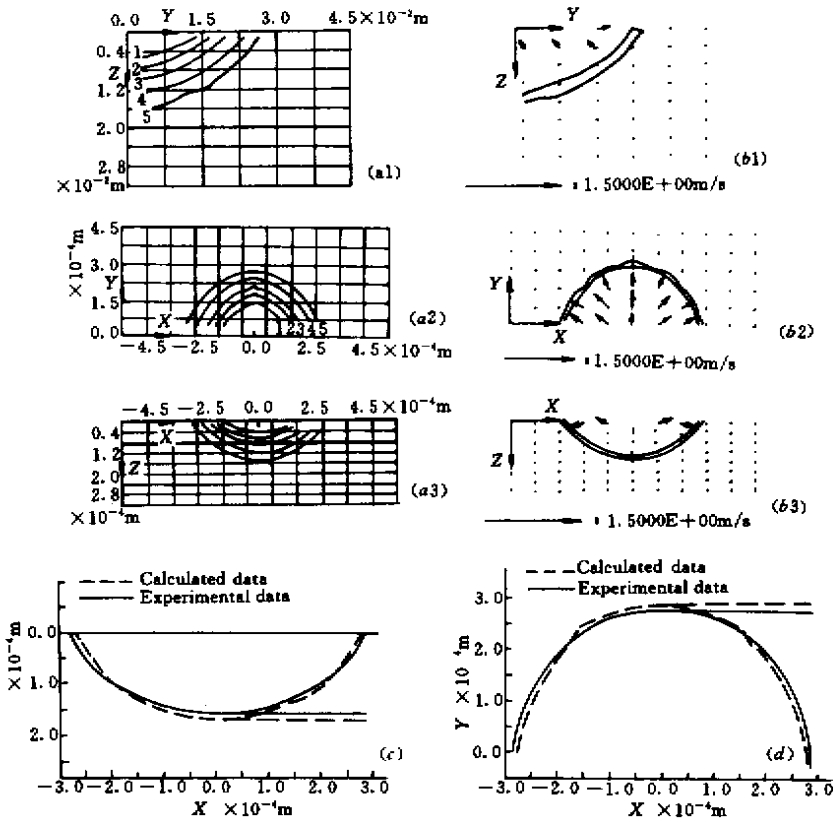


图2 铝合金激光熔池内通过原点的 yz 、 xz 和 yoz 截面上速度场与温度场计算结果

(a)(b)分别表示温度场及速度场, 1 2 3 4 5 条线分别表示 652、800、1000、1200、1400°C 等温线;

(c)(d)分别表示通过 o 点的 xy 面、 xz 面上计算和实验得到的熔池熔化边界

Fig. 2 Calculated three-dimensional velocity and temperature fields in different cross sections within laser melting zone of aluminum alloy

(a) and (b) describe the temperature and velocity fields, respectively, lines 1, 2, 3, 4 and 5 stand for 652, 800, 1000, 1200 and 1400°C isotherm line. (c) and (d) are the comparisons between the boundaries of melting zone obtained by using simulation and experiment

型解决了表面重熔过程中液相区、固相区和液-固两相区的统一计算问题, 数学模型中考虑了驱使流体流动的两种力: 熔池表面的表面张力和浮力。

(3) 移动热源引起的动量、能量的变化可分别作为动量和能量方程的附加源项加以处理。

参 考 文 献

- 1 S. Kou, D. K. Sun. Fluid flow and weld penetration stationary arc welds. *Metall. Trans. A*, 1985, **16**(A) : 203 ~ 213
- 2 S. Kou, Y. H. Wang. Three-dimensional convection in laser melted pools. *Metall. Trans. A*, 1986, **17**(A) : 2265 ~ 2270

- 3 C. Chan, J. Mazumder, M. M. Chen. A two-dimensional transient model for convection in laser melted pool. *Metall. Trans. A*, 1987, **18**(A) : 2690 ~ 2694
- 4 V. R. Voller, C. R. Swaminathan. General source-based method for solidification phase change. *Numerical Heat Transfer*, 1991, part B, **19** : 175 ~ 189
- 5 V. R. Voller, C. Prakash. A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problem. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1987, **30**(8) : 1709 ~ 1717
- 6 C. R. Heiple, J. R. Roper. Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry. *Welding J.*, 1982, **61** : 97s ~ 102s