

文章编号: 1001-3806(2002)02-0102-04

激光熔池三维非稳态对流传热过程的数值模拟^{*}

曾大文 谢长生

(华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉, 430074)

摘要: 建立了带有移动热源的激光熔池流体流动及传热过程三维非稳态数学模型。采用自适应网格技术离散求解动量方程, 计算出了不同时刻激光熔池温度分布和速度分布。结果表明, 激光熔池对流传热非稳态过程是一个预热过程, 随着时间的推移, 熔池最高温度不断升高, 熔深和熔池半径不断增大。非稳态过程按时间先后次序分为 3 个阶段: 初始阶段(加热熔化阶段)、准稳态阶段和快速升温阶段。准稳态阶段熔池形貌、温度分布和速度分布增加幅度不大, 且持续时间比另两个阶段长, 说明三维准稳态模型是三维非稳态模型的较好近似。计算结果与已有的实验结果相比大体吻合。

关键词: 激光熔池; 非稳态; 自适应网格; 温度和速度分布

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A

Numerical simulation for the process of 3D transient convection and heat transfer in the molten pool

Zeng Dawen, Xie Changsheng

(School of Materials Science and Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: A 3D model for fluid flow and heat transfer process has been developed to predict the transient distribution of temperature and velocity of a thick solid irradiated by a moving laser. The governing equations are solved by means of a finite difference on the self-adaptive grids. The results show that the unsteady-state process of fluid flow and heat transfer in laser molten pool is a preheating process as the highest surface temperature, depth and radius of the molten pool increase with the scanning time. According to the sequence of time, the unsteady-state process can be divided into three stages: the initial stage, the quasi-state stage and the rapidly rising temperature stage. At quasi-state stage, there is a little increase in the dimension and the highest surface temperature of the molten pool, the staying time is much longer than those of the other stages, which show that 3D quasi-state is a good approximation to 3D unsteady-state model. The calculated results are consistent with those obtained by Wang.

Key words: laser pool; unsteady state; self-adaptive grid; distribution of temperature and velocity

引言

为了揭示激光熔池对流传热的物理本质, 众多学者建立了激光熔池非稳态对流传热模型。Chan^[1]和 Basu^[2]等人分别建立了轴对称二维激光熔池对流传热模型(静止热源), Zacharia^[3]建立了三维模型, 从理论上阐明激光熔池的对流传热机理及激光工艺参数对组织性能的影响。但上述模型坐标原点都固定在激光上, 属于静止热源非稳态模型^[4]。我

们旨在建立带移动热源三维非稳态激光熔池对流传热过程的数学模型, 揭示三维非稳态激光熔池对流传热的基本特征。

1 激光熔池非稳态流动及传热的数学模型

图 1 为激光重熔示意图, 其物理过程详细描述见文献[5]。激光熔池对流传热的影响因素众多, 过程较复杂, 必须进行合理的简化, 我们作如下假设。

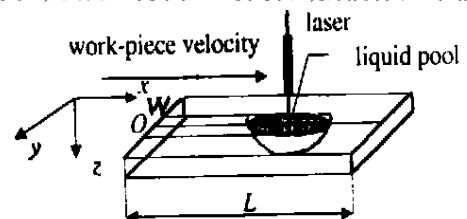


Fig. 1 The three dimensional laser remelting model

^{*} 湖北省自然科学基金、华中科技大学人才基金、科研基金及国家模具重点实验室开放基金资助项目。

作者简介: 曾大文, 男, 1967 年 2 月出生。讲师, 博士。现从事激光材料加工方面的研究工作。

收稿日期: 2000-12-21; 收到修改稿日期: 2001-06-04

工件固定不动,激光束沿 x 方向匀速运动。激光束垂直照射工件,工件具有有限尺寸(长度为 L , 宽度为 W , 高度为 H);被处理材料各向同性,即材料的热物性值与位置无关,但随温度变化而变化;为了简化表面边界条件,忽略熔池表面波纹,假设熔池表面是近似平的;假设金属液体的流动为层流;仅考虑表面张力和浮力的作用,等离子体和保护气体的影响予以忽略;坐标原点固定 O 点,不随光源移动;除浮力项外,密度为常数。

依据上述假设,非稳态激光熔池流动及传热控制方程(能量方程、动量方程和连续性方程)如下:

$$c \partial T / \partial t + c(\mathbf{V} \cdot \nabla) T = k \nabla^2 T \quad (1)$$

$$\partial \mathbf{V} / \partial t + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \mu \nabla^2 \mathbf{V} - \nabla p + \frac{g(T - T_0)}{\nabla \cdot \mathbf{V}} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (3)$$

式中, ρ 为材料密度, c 为比热容, T 为温度, t 为时间, μ 为粘度, \mathbf{V} 为速度, β 为膨胀系数, T_0 为参考温度, g 为重力加速度(与 z 轴同向), p 为压力。

边界条件如下:

上表面($z=0$):

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = \begin{cases} q & r \leq r_0 \\ h(T - T_a) + (T^4 - T_a^4) & r > r_0 \end{cases}$$

$$w = 0, \mu \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial T}, \mu \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial T}$$

式中, h 为换热系数, q 为激光功率密度, r_0 为光斑半径, $r = [(x - u_0 t)^2 + y^2]^{1/2}$ 为工件上表面任一点到光源中心的距离, T_a 为环境温度, $\partial / \partial T$ 为表面张力温度系数, u, v, w 分别为速度 \mathbf{V} 在 x, y, z 方向上的速度分量。

下表面($z=H$): $-k \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_a)$

对称面($y=0$): $v=0, \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$

侧面($y=W/2$): $-k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_a)$

端面($x=0$ 和 $x=L$): $-k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_a)$

固液界面为无滑移界面,其速度为 0: $T = T_m, u = v = w = 0$ 。

初始条件为: $T(x, y, z, 0) = T_a, \mathbf{V}(x, y, z, 0) = 0$ 。

离散采用全隐格式,具体的离散方法见文献[5]。在非交错网格下采用压力修正 simple 算法和动量插值技术求解动量方程^[6],代数方程组 ADI 迭代法求解。

2 自适应网格的生成

由于移动热源非稳态激光熔池温度分布和速度分布的特点要求采用自适应非均匀网格,给问题的解决带来相当大的难度。自适应网格的生成是解决这一问题的关键。对于激光熔池对流传热过程,自适应网格的必须满足如下条件:

(1) 生成的网格必须与热源相匹配,即热源随时间变化,网格也必须随时间变化,且热源附近的网格必须较密,满足计算精度要求。

(2) 任一时刻热源附近的网格结构(网格疏密度和网格间距)必须是相同的,确保任一时刻输入工件的热量相同。

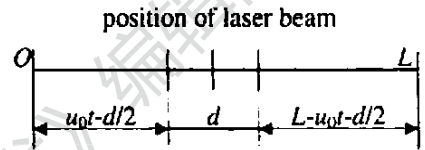


Fig. 2 Mesh structure at time t

为了满足上述自适应网格的生成条件,在 x 方向上以 t 时刻热源位置为标准将工件按图所示分为 3 段,中间一段长度为光斑直径 d (热源位于线段中点),左边一段长度为 $u_0 t - d/2$,右边一段长度为 $L - u_0 t - d/2$ (见图 2)。首先对包含热源的线段采用均匀网格划分,且对于任何时刻其所占网格节点数固定为 n_m (依据计算要求给定)。然后对左段和右段进行非均匀网格划分,左段的压缩比为 r ,所占网格节点数为 n_l ,右段压缩比为 $1/r$ (反向压缩),所占网格节点数为 n_r 。网格数 n_l, n_r 和 n_m 三者之和为网格总数 n ,且网格数 n_l 和 n_r 按如下关系式计算:

$$n_l = \frac{s}{1+s}(n - n_m), n_r = \frac{1}{1+s}(n - n_m) \quad (4)$$

式中, s 为 $u_0 t$ 与 L 的比值。由于网格结点数必须是整数,需对上式网格结点数 n_l 和 n_r 进行四舍五入取整。但取整运算带来了新问题,例如当热源位于左端时,即 $u_0 t - d/2 > 0$ 且 $L - u_0 t - d/2 \gg u_0 t - d/2$ 时,未取整之前网格结点数 n_l 满足关系 $0 < n_l < 1$,取整之后 $n_l = 0$ 。这意味着左段在网格划分过程中被丢弃,结果显然不符合实际。在热源位于右端时也存在此现象,我们称为自适应网格生成过程中的端点效应。(4) 式对热源在端点附近网格节点数分配无效,需要加以改进,以消除端点效应。

根据光源在左右端点不同位置,分如下几种情况处理:

(1) 当 $u_0 t < d/2$ 时,热源在左端点且热源光斑没有整个落在工件上,工件左段长度为 0,不分配网格节点数,右段网格节点数 n_r 为 $n - n_m$ 。

(2) 当 $u_0 t > d/2$ 且 $n_l < n_{min}$ 时,热源紧邻左端点,左段网格节点数 n_l 取 n_{min} ,右段网格节点数 n_r 为 $XN - n_{min} - n_m$,其中, n_{min} 为最小网格节点数,依据网格节点总数而定,一般取为 $XN/10$ 。

(3) 当 $L - u_0 t < d/2$ 时,类似情况(1),热源在右段点,工件右段长度为 0,不分配网格节点数,左段网格节点数 n_l 为 $n - n_m$ 。

(4) 当 $L - u_0 t > d/2$ 且 $n_r < n_{min}$ 时,类似情况(2),热源紧邻右端点,右段网格节点数 n_r 取 n_{min} ,左段网格节点数 n_l 为 $n - n_{min} - n_m$ 。

这样划分的网格,确保了所有时刻热量输入相同,且网格随时间变化,与热源相匹配。热源附近网格采用均匀网格,有利于提高计算精度。

3 计算结果及分析

计算工件尺寸为 $40\text{mm} \times 35\text{mm} \times 10\text{mm}$,材料为铝合金,其热物性参数见文献[5]。计算所用激光功率为 2kW ,光斑直径为 3mm ,扫描速度为 4mm/s ,吸收率选取为 0.5 。计算网格节点数为 $40 \times 24 \times 20$,时间网格节点数 tN 为 40 ,为均匀网格,步长为 $L/(u_0 \cdot tN)$ 。图 3 为扫描时间 5s 时的温度分布、速度分布,计算结果与文献[2]类似。图 4 显示随着时间的推移,熔池最高温度、熔池深度和半宽的变化分为 3 个阶段:加热初始阶段,熔池最高温度、熔池深度和半宽随时间从零直线快速上升到局部最高,然后略有下降,这一阶段时间较短;准稳态阶段,熔池最高温度、熔池深度和半宽随时间推移而略有增加,但变化幅度不大,工程上称为准稳态,这一阶段持续时间最长,且与工件长度有关,若假设工件在热源运动方向上无限长,则为典型准稳态过程;迅速升温阶段,随着时间的推移,熔池最高温度、熔池深度和半宽迅速增加。在加热熔化和迅速升温阶段有一个共同特点,熔池最高温度、熔池深度和半宽都达到局部最大,表现出明显的端点效应,其主要原因是端点处熔池内的热量只能单向传导,热量来不及向熔池外散发,不断积累在熔池内,使熔池内金属液体温度不断升高,温度梯度增大,流速加快,熔深和半宽增加。

准稳态阶段熔池热量向外散发是双向的,因而注入熔池的热量和散发到熔池外的热量能基本保持平衡,所以随时间的推移,从热源中心观察,熔池形貌、温度分布和速度分布也基本保持不变,这一结果

也说明了除端点外,三维准稳态模型是三维非稳态模型较好近似。

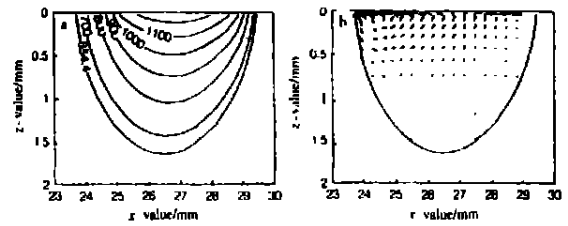


Fig. 3 Distribution of temperature and velocity in laser pool
a—temperature distribution b—velocity distribution

图 4 还显示,激光加工过程中,熔池最高温度、最大流速、熔深和半宽随时间变化不断增加,即激光加工过程也是一个预热过程。其原因是光源不断地向熔池注入热量,使基材温度不断升高,前一时刻对后一时刻存在一个预热作用,致使后一时刻基材温度高,产生同样大的熔池所需热量少,同时相同温度梯度条件下熔池向基材传热相对较困难,而光源注入的热量是相同的,因而相对前一时刻而言,后一时刻热量在熔池中积累,导致熔池温度升高,温度梯度增大,流速加快,熔池变大。

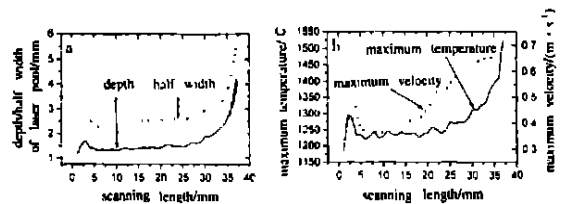


Fig. 4 Changes in depth, radius and maximum temperature of laser pool with scanning length
a—depth and radius of laser pool b—maximum temperature of laser pool

计算结果表明,末端效应持续时间比初始端点效应持续时间长,熔池温度和速度上升较快。主要是因为加热初始阶段是一个过渡阶段,由于热源的移动,熔池向外散热迅速由单向变为双向,进入准稳态阶段,且基材刚开始预热,温度不高,为熔池热量散发提供条件。而末端效应是一个终态,熔池热量只能向一个方向散发,且由于预热作用,基材温度已明显上升,熔池向外散热十分困难。

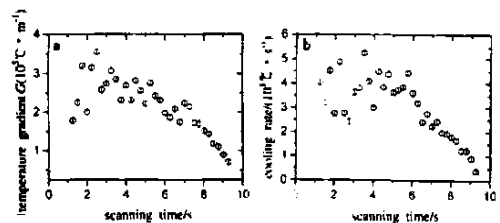


Fig. 5 Changes of temperature gradient G and cooling rate R with scanning time at pool edge
a—temperature gradient G b—cooling rate R

图 5 为熔池边缘(对应图 1 W 点)温度梯度 G 和凝固速度 R 随时间的变化趋势。从图可以看出, 随时间的推移, 温度梯度 G 和凝固速度 R 开始震荡变化, 随后迅速下降。这是预热效应和末端效应共同作用的结果, 对熔池组织会产生较大影响。

铝合金激光重熔枝晶组织的特征长度是枝晶二次臂间距 λ_2 。依据凝固理论, 预热效应和末端效应使工件末端枝晶二次臂间距 λ_2 变大, 组织粗化。为了有效地考察预热效应和末端效应对枝晶组织粗化程度, 定义枝晶相对二次臂间距 如下:

$$= \lambda_2 / \lambda_{q_0} = (R_{q_0} / R)^{1/3} \quad (5)$$

式中, R_{q_0} , λ_{q_0} 分别为准稳态阶段冷却速率和枝晶二次臂间距的平均值。 > 1 , 说明枝晶组织粗化; 反之, < 1 , 说明枝晶组织细化。

图 6 为相对枝晶二次臂间距 随扫描长度变化曲线。结果表明, 准稳态阶段, 相对二次臂间距 在 0.9 ~ 1.1 之间波动, 迅速加热阶段相对二次臂间距 也迅速上升, 末端激光熔池边缘 W 点二次臂间距 λ_2 为准稳态阶段的两倍, 说明预热效应和末端效应使激光熔池组织特征长度增大, 组织粗化。这一结果提示我们, 在截取激光表面强化层金相试样进行微观分析, 应在准稳态阶段截取, 否则观察结果的偏差会不准确(大于 20%, 见图 6)。

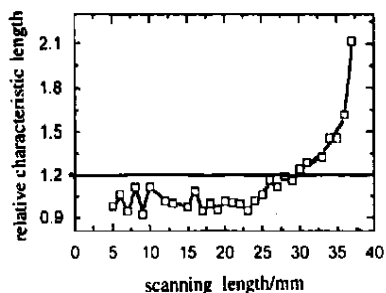


Fig. 6 Changes of relative dendrite second arm distance (RSDAS) with scanning speed

图 7(实线是计算值, 虚线是实验值) 表明计算结果和实验结果^[7] 大体吻合, 说明算法是有效的。同时实验结果表明, 随着时间的推移, 工件温度随之上升, 即激光加工过程中工件被预热, 从实验验证了激光加工是一个预热过程, 定性说明了数值结果的合理性。

图 7 还表明, 预热温度为 400 时计算值大于实验值, 实验值和计算值之间偏差较大。其原因是

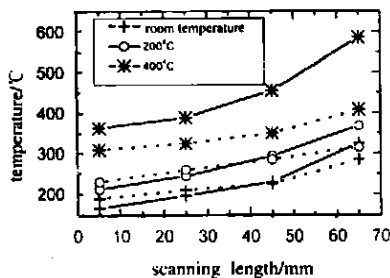


Fig. 7 Effects of preheating temperature on temperature distribution of substrate, process parameters: $P = 2\text{kW}$, $D = 4\text{mm}$, $u_0 = 4\text{mm/s}$

实验过程中预热装置不是固定在工作台上, 工件从保温炉中取出到固定在工作台上需要一定时间。由于工件与环境之间的温差较大, 工件向环境散热, 自身温度下降, 固定在工作台上的工件初始温度小于 400, 导致实测温度较小。

4 结 论

我们建立了带有移动热源的激光熔池流体流动及传热过程的三维非稳态数学模型, 计算出了熔池温度分布和速度分布。得出如下结论:

- (1) 激光熔池对流传热非稳态过程是一个预热过程, 随着时间的推移, 熔池最高温度不断升高, 熔深和熔池半径不断增大。
- (2) 非稳态过程按时间先后次序分为 3 个阶段: 加热熔化阶段、准稳态阶段和迅速升温阶段。其中准稳态阶段熔池形貌、温度分布和速度分布增加幅度不大, 且保持时间比另两个阶段长, 说明三维准稳态模型是三维非稳态模型的较好近似。
- (3) 预热效应和末端效应的共同作用导致末端激光熔池组织粗化。

参 考 文 献

- [1] Chan C, Mazumdar J, Chen M M. Metall Trans A, 1984, 15A (12): 2175.
- [2] Basu B, Date A W. Int J Heat Mass Transfer, 1990, 33(6): 1149.
- [3] Zacharia T, Eraslan A H, Aidun D K. Welding Journal, 1988, 67 (3): 53.
- [4] Modest M F. Int J Heat Mass Transfer, 1996, 39(2): 221.
- [5] Patankar S V. Translated by Zhang Zh. Numerical Calculation of Fluid Flow and Heat Transfer. Beijing: Science Press, 1980.
- [6] 曾大文, 谢长生. 金属学报, 1999, 35(6): 604.
- [7] Wang A H. Investigation into Laser Beam Cladding of Aluminum Alloy and Its Behavior in the Transitional Region. PH D Dissertation, HUST, 1997: 43.