

文章编号: 1001-3806(2003)02-0090-04

快速激光重熔的二维瞬态模型

朱大庆 左都罗 李适民

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

摘要: 通过采用有限元与多层网格法, 求解热传导和对流方程, 建立了模拟快速激光重熔的二维瞬态模型, 并用该模型模拟了高扫描速度(2m/s)与低扫描速度(0.2m/s)情况下, 时变的脉冲激光与连续激光重熔的物理过程。模拟结果显示, 激光扫描速度对熔池内的流线分布的较大影响, 从而影响到重熔后材料表面的成分分布。低扫描速度下材料表面同一区域可被多个脉冲加热, 而高扫描速度下只被一个脉冲加热。熔池表面的形状在重熔过程中呈现中心凹陷, 边缘凸起。此外, 还通过模拟结果得到了熔池的大小、形状、平均冷却速度和边缘材料冷却速度, 这些冷却速度对于分析材料表面的微观结构是有用的。

关键词: 激光重熔; 瞬态模型; 对流; Marangoni 流

中图分类号: TN249 文献标识码: A

2D transient model for rapid laser remelt

Zhu Daqing, Zuo Duluo, Li Shimin

(National Laboratory of Laser Technology, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: A two-dimensional transient model for high speed laser remelt was presented by solving the heat conduction and convection equations through finite element method and multigrid method. The time dependent physical process of laser remelt under CW laser and pulse laser with high scanning speed (HSP) (2m/s) and low scanning speed (LSP) (0.2m/s) were simulated. The result shows that the scanning speed has big impact on the streamline and the distribution of the composition. It also shows that the same area on surface may be heated by multi-pulses of laser under LSP while it only be heated by one pulse under HSP. The result indicates that during laser remelt, the surface of the melt pool changes, the middle hollows and the edge rises. In addition, the shape, the size, the average cooling rate of the pool and the cooling rate at the edge of the pool can be obtained through the results. These cooling rates are useful to analyze the microstructure.

Key words: laser remelt; transient model; convection; Marangoni flow

引 言

激光表面重熔作为激光加工的一种, 具有许多独特的优点, 从而得到广泛的应用^[1]。从 20 世纪 70 年代开始就有不少关于激光表面重熔的理论研究^[2~13]。这些研究中, 激光扫描速度都比较低(0.01m/s~0.1m/s)。由于激光表面重熔的种类很多, 有的种类激光扫描速度快, 如激光刻花, 其速度可达 1m/s~10m/s, 与熔池内熔质流动速度是相同的量级, 另外, 随着激光器功率的提高, 激光重熔的速度越来越快。高扫描速度对熔池内部的流线分布与低扫描速度不同, 因此, 需要对高扫描速度激光重

熔进行研究。

在 FEATFLOW 软件^[14]的基础上建立了一个能够模拟高扫描速度情况下激光重熔的二维瞬态模型, 模拟了连续激光和脉冲激光作用下的时变过程。该模型只考虑了传导与对流传热。

1 物理模型

激光扫描速度为 $-v_{\infty}$, 若采用以激光束静止的参照系, 则材料以 v_{∞} 运动。激光刻花的物理过程包含质量、能量和动量的传输过程。计算区域如

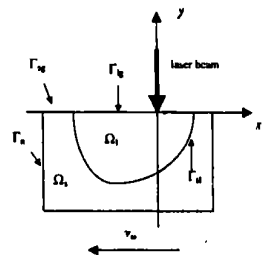


Fig. 1 Calculation domain for laser remelt

图 1, 其中各个符号的意义是: Ω_l 为液态区, Ω_s 为固态区, Γ_{lg} 为气液界面, Γ_{sg} 为固气界面, Γ_{sl} 为固液界面, Γ_n 处温度的边界条件为齐次 Neumann 边界条

作者简介: 朱大庆, 男, 1966 年 10 月出生。博士。现从事激光加工等方面的研究工作。

收稿日期: 2002-03-26; 收到修改稿日期: 2002-08-20

件。忽略气液边界的变化,相应的能量、动量和质量传递方程与边界条件为^[11]:

$$\rho c_p \partial T / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} - 2\mu \nabla \cdot \vec{D}(\mathbf{v}) + \nabla P = 0 \quad (2)$$

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

$$k \partial T / \partial \mathbf{n} = q_1 \mathbf{n}_y \quad (\text{在上表面}) \quad (4)$$

$$k \partial T / \partial \mathbf{n} = 0 \quad (\text{边界 } \Gamma_n \text{ 上}) \quad (5)$$

$$T = T_{sl} \quad (\text{固液边界 } \Gamma_{sl} \text{ 上}) \quad (6)$$

$$T = T_\infty \quad (\text{其余的边界}) \quad (7)$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{V}_\infty \quad (\text{固液边界 } \Gamma_{sl} \text{ 上}) \quad (8)$$

$$\frac{d\gamma}{dT} \frac{\partial T}{\partial s} = \mu \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{n}} \cdot \mathbf{s} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial s} \cdot \mathbf{n} \right) \quad (\text{气液边界 } \Gamma_{lg} \text{ 上}) \quad (9)$$

式中, q_1 为材料表面吸收的线激光功率密度; s 为表面切向方向单位矢量, \mathbf{n} 为表面法线方向单位矢量, \mathbf{n}_y 为 y 方向的分量; T 为绝对温度, \mathbf{v} 为速度, T_∞ 为环境温度, T_{sl} 为材料熔点, γ 是液态材料表面张力系数, μ 为粘滞系数, ρ 为材料密度, 对固态和液态取相同的值, k 为材料热导率, c_p 为材料定压热容量, $\vec{D}(\mathbf{v}) = [\nabla \mathbf{v} + (\nabla \mathbf{v})^T] / 2$ 。

2 数值模拟

数值模拟是基于 FEATFLOW 软件, 该软件采

Table 1 Physical properties and some parameters used in calculation

name	specific heat	thermal conductivity	melt point	density	viscosity	viscosity change with temperature	bulk expansion coefficient	laser beam dispersion
symbol	c_p	k_0	T_m / K	ρ	μ_0 / Ns	$d\gamma/dT$	$b_1 / (\text{m} \cdot \text{K}^{-1})$	σ / m
value	836	31.35	1536	7800	0.01	-5.3×10^{-4}	1.0×10^{-4}	0.00005

用于在低扫描速度下(线功率密度为 $3.5 \times 10^5 \text{ W/m}$)首次模拟结果显示熔池之间发生搭接现象, 故还在较低线功率密度下进行了模拟。加工参数见表 2。对高扫描速度计算区域为 $x = -1.5 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm} \sim 0.2 \text{ mm}$; 对低扫描速度计算区域为 $x = -1.5 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm} \sim 0.5 \text{ mm}$ 。最细

Table 2 Process parameters

	line power density / ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$)	scanning speed / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	occupancy rate	frequency / Hz
CW	5.0×10^5	2.0		
laser	3.5×10^5	0.2		
pulses	5.0×10^5	2.0	0.5	10^4
laser	3.5×10^5	0.2	0.5	10^3
	2.5×10^5	0.2	0.5	10^3

用了非正则单元有限元方法与多层网格方法, 是专门用于流体计算的软件。本模型在该软件的基础上加入了热传导的求解, 采用分离方程法 (segregated equation method: SEM)^[15] 对速度和温度进行解耦合。整体算法为: (1) 初始化: 网格生成, 初始化矩阵, 计算与时间无关矩阵, 设定初始温度 T^0 和速度 \mathbf{v}^0 ; (2) 温度计算: 已知 t^n 时刻的速度与温度分布 \mathbf{v}^n 和 T^n , 可求得 t^{n+1} 时刻的温度分布 T^{n+1} ; (3) 速度与压强分布计算: 通过 t^n 时刻的速度与压强分布 \mathbf{v}^n 和 P^n 及最新的温度分布 T^{n+1} , 可以求出 t^{n+1} 时刻的速度与压强分布 \mathbf{v}^{n+1} 和 P^{n+1} , 为避免跟踪固液界面, 采用了大粘滞系数法, 即在固态区域的粘滞系数等于液态区域粘滞系数乘以一个数, 如 10^6 ; (4) 重复步骤 2 和 3, 直到预设的时刻或速度与温度的相对变化小于预设的值, 如 10^{-3} 或 10^{-4} 。

计算所需的物性参数和一些其它参数见表 1。激光束中心处于 $x = 0$, 并假设激光束是高斯分布, 即 $q_1(x) = \frac{P_1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$, 其中 P_1 为到达材料表面的激光功率, σ 为表面光束半径。边界条件(7)式设为 $T_\infty(x, y) = T_0$, 其中 T_0 为环境温度, 设为 300K。

为了比较高扫描速度与低扫描速度的差别, 模拟了两种扫描速度下连续与脉冲激光作用的过程;

网格有 12000 单元。

3 结果与讨论

3.1 温度分布

温度场的结果见图 2 至图 5。图 2 和

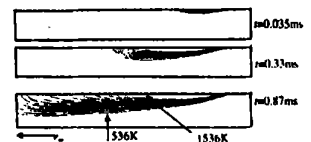


Fig. 2 Isotherms with time (536K~1536K), CW laser, $v_\infty = 2.0 \text{ m/s}$, $P_1 = 5.0 \times 10^5 \text{ W/m}$

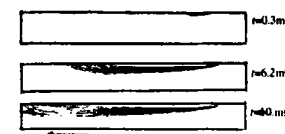


Fig. 3 Isotherms with time (536K~1536K), CW laser, $v_\infty = 0.2 \text{ m/s}$, $P_1 = 3.5 \times 10^5 \text{ W/m}$

图 3 是连续激光作用下的等温线。经过一定时间后, 熔池达到稳定, 当扫描速度为 2m/s 时, 这个时间约 0.85ms, 速度为 0.2m/s 时, 时间约 9ms。

图 4 和图 5 显示了第 1 个脉冲作用下熔池的形

成过程和数个脉冲后材料内部的等温线分布。由图中可以看出,在扫描速度为2m/s时,激光脉冲对前一个脉冲形成的熔池附近的等温线分布没有影响;但在扫描速度为0.2m/s时,激光脉冲对前一个脉冲形成的熔池附近的等温线分布产生影响,笔者把这种现象称为脉冲之间的相互影响。

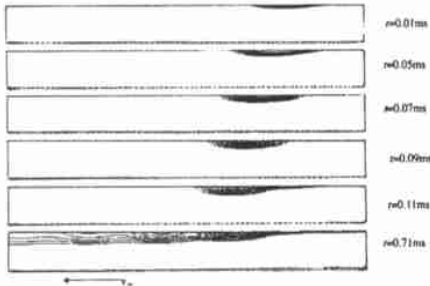


Fig. 4 Isotherms with time(536K~1536K), pulse laser, $v_{\infty} = 2\text{m/s}$, $P_1 = 5.0 \times 10^5 \text{W/m}$

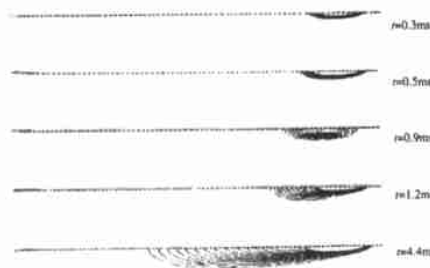


Fig. 5 Isotherms with time(536K~1536K), pulse laser, $v_{\infty} = 0.2\text{m/s}$, $P_1 = 3.5 \times 10^5 \text{W/m}$

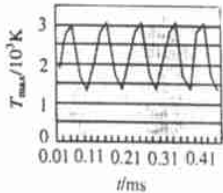


Fig. 6 The highest temperature at the surface with time, pulse laser, $v_{\infty} = 2.0\text{m/s}$, $P_1 = 5.0 \times 10^5 \text{W/m}$

加,最小的最高度也可能超过材料的熔点,即在两个脉冲之间,材料表面有未固化的区域,造成熔池之间搭接。降低功率密度进行计算,虽然在最初几个脉冲作用下材料表面最小最高温度低于材料的熔点,但最大最高温度还是随着时间增加。其原因在于,在低扫描速度下,脉冲之间的相互影响使得对材料的加热不是单个脉冲

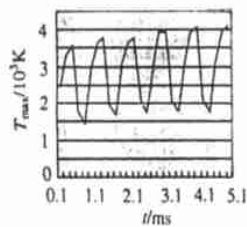


Fig. 7 The highest temperature at the surface with time, pulse laser, $v_{\infty} = 0.2\text{m/s}$, $P_1 = 3.5 \times 10^5 \text{W/m}$

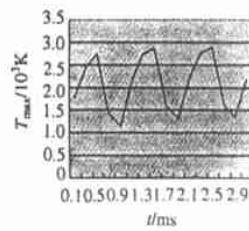


Fig. 8 The highest temperature at the surface with time, pulse laser, $v_{\infty} = 0.2\text{m/s}$, $P_1 = 3.5 \times 10^5 \text{W/m}$

的作用,而是多个脉冲对材料表面同一位置的加热都有影响,这样,当某一脉冲到达材料表面时,前面脉冲的加热影响还没有消除,于是在加工初期,材料表面的最大最高温度随时间增加。

计算出来的温度分布可以有很多直接的应用。首先,可以通过温度分布估算熔池的大小。由图4确定温度等于熔点的等温线,估算的熔池长度约0.08~0.1mm,深度约0.04mm,与实验结果相符^[16]。连续激光作用下熔池的长度约0.3mm~0.4mm。另外,可以通过温度场的分布及其随时间的变化估算熔池的平均冷却速度与熔池边缘的冷却速度,这些能对材料表面的微观结构分析提供帮助。平均冷却速度可以通过熔池表面中心的温度变化来估算。从图4的结果可以得到相邻两熔池表面中心的温差约1869K(其中一个为刚形成的熔池),距离约0.2mm,扫描速度2m/s,则平均冷却速度为: $\eta = \frac{1869 \times 2}{0.2 \times 10^{-3}} \approx 2 \times 10^7 \text{K/s}$ 。熔池边缘的冷却速度 η 可通过 $\eta = v_{\infty} \cdot \nabla T$ 来估算。在图4中,熔池边缘单元上温差约70K,单元尺寸为 $h = 0.00333\text{mm}$,则边缘的冷却速度为: $\eta = v_{\infty} \times \frac{\nabla T}{h} = 4.1 \times 10^7 \text{K/s}$ 。

3.2 等压线

图9为连续激光作用下计算区域的等压线。计算结果表明,高扫描速度下熔池内的压强差比低扫描速度下的大。同时,在两种扫描速度下,熔池内的压强分布是相同的,即熔池中心的压强比熔池边缘的小,这表明在激光作用过程中熔池表面会发生改变,来抵消这种压强差。具体地说,就是熔池中心凹陷下去,熔池边缘凸起。脉冲激光作用下,熔池内的压强分布与连续激光作用下相同,只是数值不同。

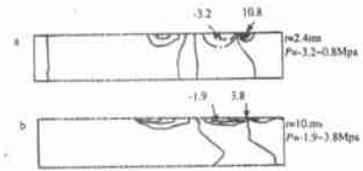


Fig. 9 Isobar CW laser

a - $v_{\infty} = 2.0\text{m/s}$, $P_1 = 5.0 \times 10^5 \text{W/m}$
b - $v_{\infty} = 0.2\text{m/s}$, $P_1 = 3.5 \times 10^5 \text{W/m}$

3.3 熔池内的流线分布与速度场

图10与图11为熔池附近的流线与速度场。为了显示熔池,同时给出了温度分布。低扫描速度下

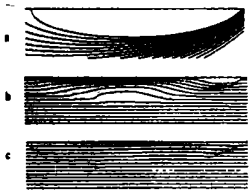


Fig. 10 Streamline and velocity field near a melt pool, CW laser, $v_{\infty} = 2.0\text{m/s}$, $P_1 = 5.0 \times 10^5\text{W/m}$
a - isotherm b - streamline
c - velocity field

加到熔池内的流动上,其影响比低扫描速度时大,使得高扫描速度下熔池内的环流不明显。

4 结论

在 FEATFLOW 软件的基础上结合传热方程的求解,建立了激光重熔的二维瞬态模型。模型考虑了热传导传热与对流传热。模拟了高扫描速度(2m/s)与低扫描速度(0.2m/s)情况下连续激光和脉冲激光重熔的物理过程。模拟流场显示,激光扫描速度对熔池内熔质流动的流线分布有较大影响;等温线分布显示在低扫描速度下材料表面同一区域易受到不同脉冲的影响,而在高扫描速度下只受到一个脉冲的影响;还可以从等温线分布得到

的流线和速度分布与其它文献相同^[2~12]。由图可知,高扫描速度和低扫描速度下熔池内流线形状不同。原因在于熔池内的最大流速为1m/s~10m/s,材料的移动相当于一个整体的流动,当扫描速度为2m/s时,这个整体流动的速度场叠

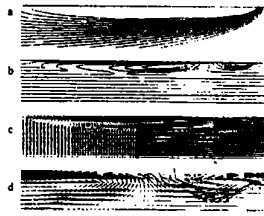


Fig. 11 Streamline and velocity field near a melt pool, CW laser, $v_{\infty} = 0.2\text{m/s}$, $P_1 = 3.5 \times 10^5\text{W/m}$
a - isotherm b - streamline
c - velocity field
d - velocity field of the part in melt pool

熔池的大小、形状以及熔池的平均冷却速度和熔池边缘材料的冷却速度,这些冷却速度能够帮助分析材料表面的微观结构;从等压线分布可以预测熔池表面的形状在重熔过程中将发生变化,熔池中心凹陷,边缘凸起。这些结果与实验结果和其它模拟低扫描速度模型的结果相符。

参 考 文 献

- [1] 徐恒钧. 北京工业大学学报, 1998, 24(3): 130~136.
- [2] Cline H E, Anthony T R. J A P, 1977, 48(9): 3895~3900.
- [3] Kou S, Hsu S C, Mehrebian R. Metall Trans B, 1981, B12(3): 33~45.
- [4] Chan C, Mazumder J, Chen M M. Metall Trans A, 1984, A15(2): 2175~2184.
- [5] Chande T, Mazumder J. J A P, 1985, 57(6): 2226~2232.
- [6] Kou S, Wang Y H. Metall Trans A, 1986, A17(12): 2265~2270.
- [7] Chan C, Mazumder J, Chen M M. Mater Sci Technol, 1987, 3(4): 306~311.
- [8] Chan C, Mazumder J, Chen M M. J A P, 1988, 64(11): 6166~6174.
- [9] Hoadley A, Rappaz M. Metall Trans B, 1991, B22(2): 101~109.
- [10] Mazumder J. Opt Engng, 1991, 30(8): 1208~1219.
- [11] Picasso M, Hoadley A F A. Int J Num Meth Heat Fluid Flow, 1994, 4: 61~83.
- [12] Ravindran K, Srinivasan J, Marathe A G. Mech Res Commun, 1995, 22(3): 291~304.
- [13] Yilbas B S. Int J Heat Mass Transfer, 1997, 40(5): 1131~1143.
- [14] Tuerk S. Featflow finite element software for the incompressible Navier-Stokes equations: user manual. <http://gaia.iwr.uni-heidelberg.de/%7Efeatflow/>, 1998.
- [15] Tuerk S. Int J Num Meth in Fluids, 1994, 18: 71~105.
- [16] Zhu D Q, Zuo D L, Li Sh M. Laser Tech, 2000, 24(1): 24~26.
- [9] 查莹, 周昌焱, 唐西南 *et al.* 中国激光, 1999, A26(10): 947~950.
- [10] Shi G, Liu J, Ding P *et al.* Mater Sci & Technol, 1998, 14: 80~84.
- [11] 陈传忠, 王文中, 曹怀华 *et al.* 中国激光, 1999, A26(9): 841~846.
- [12] 裴宇韬, 孟庆昌, 欧阳家虎 *et al.* 中国激光, 1995, A22(12): 935~938.
- [13] 刘宁, 田春艳, 舒士明 *et al.* 硅酸盐学报, 1998, 26(2): 200~216.
- [14] 章守华主编. 合金钢. 北京: 冶金出版社, 1981: 4~8.

(上接第84页)