

# 激光加热温度场物理分析

魏在福 查鸿逵 王润文

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘 要** 本文采用数值模拟法分析了激光加热温度场分布, 此方法简单具有一般性, 没有解析法通常所有的局限性. 分析了材料表面热辐射, 激光作用时间及功率密度对温度场分布的影响, 作者认为此数值模拟结果是符合实际的.

**关键词** 激光加热, 数值方法, 温度分布.

## 1 引 言

激光与材料的相互作用是一个较复杂的物理过程, 其温度场分布不仅与材料的本身性质(热容、热导系数、比重)有关, 而且与激光加热参数(功率密度、能量分布、作用时间)有直接的关系, 加上激光与材料相互作用会因光吸收、反射、辐射、热辐射、热传导以及等离子体效应与溅射效应等, 使表面与光辐射交换变得极为复杂, 因此通过理论分析, 由于表面非线性边界条件, 使得用解析法来求解热传导方程找出温度场分布的解析解将会变得非常困难, 即使能求解得出, 也要忽略诸多重要的因素来简化热导方程, 这加大了与实际情况的误差<sup>[1~3]</sup>, 同时也难与实际情况相比较.

本文采用数值分析的方法, 考虑到激光与材料相互作用具有非线性边界条件的特点, 尽量减小温度场分布的误差, 使其更接近于实际情况, 选择合理的激光加工参数来分析高功率激光与金属材料的加热过程, 对了解和分析激光与材料的热相互作用过程无疑是十分重要的.

## 2 计算模型的建立

由于高功率激光加热材料过程中, 除了热吸收、热传导、热辐射作用外, 还有热波的热扩散作用, 由于热扩散比起热传导要小得多, 因此, 为简化理论计算略去了这一因素. 假设被加热的材料为导热性不变的半无穷大均匀平板, 材料表面为理想吸光表面, 即材料表面吸收系数为无穷大. 从  $t = 0$  开始, 一中心对称的高斯光束垂直入射半无穷大平板, 如图 1 所示,  $r$  轴平行于平板表面, 原点  $O$  位于平板表面入射光束中心处.

设  $t$  时刻材料表面温度为  $T(r, z=0, t)$ , 环境温度为  $T_A(r, z=0, t)$ , 考虑到被加热材料表面向空间

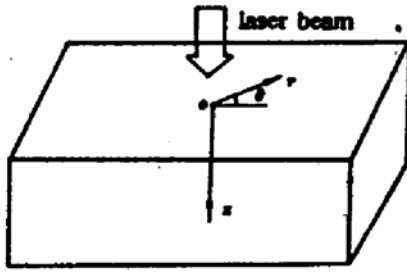


Fig. 1 Calculation model in the cylindrical coordinate system

的热辐射, 因此, 存在如下的非线性边界条件:

$$K \frac{\partial T(r, z=0, t)}{\partial z} = \sigma \varepsilon (T(r, z=0, t)^4 - T_A^4(r, z=0, t)) \quad (1)$$

式中  $K$  为热导系数,  $\varepsilon$  为材料表面的发射率 ( $\varepsilon < 1$ ),  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常数. 这一边界条件相当于 Stefan-Boltzmann 定律自截面  $z = 0$  向温度为  $T_A(t)$  的空间媒质辐射, 为了简化边界条件作如下处理, 利用差分定理作近似处理, 即:

$$T^4 - T_A^4 \approx (T - T_A) \frac{\partial T^4}{\partial T} \Big|_{T_A} = 4T_A^3 (T - T_A) \quad (2)$$

由于激光对材料迅速加热过程中  $T \gg T_A$ , 因此, 可近似地把上面非线性边界条件简化为:

$$\frac{\partial T(r, z=0, t)}{\partial z} = \gamma T \quad (3)$$

其中

$$\gamma = \frac{4\sigma\varepsilon T_A^3}{K}$$

因为已取定的材料为均匀介质,  $r$  方向热传导性质相同, 激光是轴向对称, 在垂直于材料表面入射情况下, 物理状况将绕  $Z$  轴对称. 在直角坐标下热导方程为:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (K_x(T)) \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} (K_y(T)) \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} (K_z(T)) \frac{\partial T}{\partial z} + g(x, y, z, t) \quad (4)$$

材料的热导系数由均匀性假定必然导致各向同性, 同时材料由室温到熔点温度下, 热传导系数变化一般 10% 左右, 可认为与  $T$  无关, 即  $K_x(T) = K_y(T) = K_z(T) = K = \text{const.}$  于是热导方程为:

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T + g(x, y, z, t) \quad (5)$$

因此, 激光加热半无穷大平板, 在柱坐标系中的传导方程和相应的边界条件、初始条件为

$$\left\{ \begin{array}{l} C \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} - K \left[ \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, z, t)}{\partial z^2} \right] = g(r, z, t) \quad (6) \\ \frac{\partial T(r, z=0, t)}{\partial z} = \gamma T(r, z=0, t) \quad (7) \\ T(r, z=\infty, t) = T(r=\infty, z, t) = 0 \quad (8) \\ T(r, z, t=0) = T_0(r, z) \quad (9) \end{array} \right.$$

式中  $C$  为材料的热容,  $g(r, z, t)$  为材料单位时间和单位体积内吸收的功率,  $\gamma$  为热辐射速率,  $T_0(r, z)$  为初始温度分布. 数值计算中的交替方向隐式法<sup>[4]</sup>可以求解方程(6)~(9), 从而得出温度场分布. 设激光束强度分布呈高斯型:

$$I(r, t) = I_0 \exp \left[ - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] = \frac{P_0(t)}{\pi r_0^2} \exp \left[ - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (10)$$

式中  $r_0$  为入射激光束的高斯半径, 按高斯分布  $I_0$  表示在  $r = r_0$  处激光束的强度为  $r = 0$  处强度的  $e^{-1}$ , 占高斯光斑总能量的 85%,  $P_0(t)$  为入射激光束的能量时间函数.

### 3 计算分析

在选定被加热材料后,合理地选取激光加热参数,通过数值分析确定出激光加热的期望值(温度渗透深度,温度扩散范围),这将加快激光加热工艺优化进程.一般情况下,激光淬火所需激光功率密度  $10^3 \sim 10^5 \text{ W/cm}^2$ <sup>[5]</sup>,能量密度为  $10^2 \sim 10^3 \text{ J/cm}^2$ <sup>[5]</sup>,激光作用时间一般为 ms 量级.

以低碳钢为例,其参数为:比重  $\rho = 7.833 \text{ g/cm}^3$ ,热容  $C = 3.63 \text{ J/cm}^3 \cdot \text{K}$ ,热导系数  $K = 0.54 \text{ W/cm} \cdot \text{K}$ ,激光功率  $P = 2000 \text{ W}$ ,高斯半径  $r_0 = 0.5 \text{ mm}$ ,光斑直径  $5 \text{ mm}$ ,功率密度  $10^4 \text{ W/cm}^2$ ,激光的区域作用时间  $50 \text{ ms}$ 、 $100 \text{ ms}$ 、 $150 \text{ ms}$ ,表面热辐射速率  $\gamma = (4\sigma\epsilon)/K T_A^3 = \frac{4 \times 5.67 \times 10^{-12} \times 0.7}{0.54} \times 1000 = 2.94 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ ,起始温度  $0^\circ\text{C}$

#### 3.1 材料表面热辐射对温度场分布的影响

选取激光功率密度为  $10^4 \text{ W/cm}^2$ ,激光作用时间为  $100 \text{ ms}$ ,当  $\gamma = 0$  与  $\gamma = 2.94 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$  时,其温度场分布如图 2 所示.由图中可以看出,材料表面的热辐射对温度场分布有较大影响,在不考虑材料表面热辐射时( $\gamma = 0$ ),即当材料表面为绝热边界,与外界无热交换时,其表面温度最高,且与材料内部温度梯度较大.当考虑表面热辐射时,即材料表面通过热辐射与外界进行热交换,此时表面温度与材料内部温度在一定深度里变化较缓慢,且温度最大值不在表面,而是在  $z = 0.09 \text{ mm}$  处,这是因为材料表面的辐射强度与  $T^4$  成正比,随着温度的升高,表面热辐射加强,因此,材料表面因热辐射损失一部分能量,另外金属的热导系数  $K$  较大,热量向材料内部传导较快,因此,在激光作用时间不太短时,材料内部温度比表面温度稍有增大.

#### 3.2 激光作用时间对温度场分布的影响

在激光功率密度为  $10^4 \text{ W/cm}^2$ ,热辐射速率  $\gamma = 2.94 \times 10^{-2}$  情况下,分别选取激光作用时间为  $t = 50 \text{ ms}$ 、 $100 \text{ ms}$ 、 $150 \text{ ms}$ ,其温度场分布如图 3 所示.从图中可以看出,随时间  $t$  增大,表面温度与材料内部温度差有所加大,沿  $z$  方向温度作用范围增加,但随  $t$  增大,温度场分布变化趋于缓慢,即温度梯度减小.因为在同一功率密度下,激光作用时间短,材料表面吸收能量后,在相对较短的时间内,材料表面薄层温度升高很快,这样在短时间内温度传导距离不

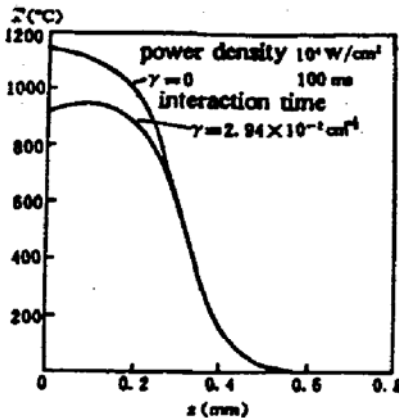


Fig. 2 The effect to the temperature distribution of the material surface heat radiation

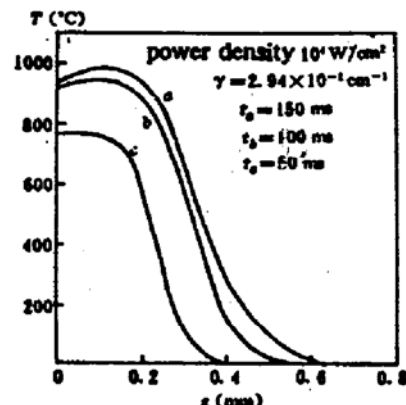


Fig. 3 The effect to the temperature distribution of laser interaction time

大,因此,材料表面温度与内部温度相差不大,在材料表面形成一个薄的均匀温度场分布层.

当激光作用时间增大时,激光能量密度增大,当材料表面吸收此能量后,在相对较长的时间内,温度向材料内部传导增加,加之材料表面的热辐射,致使材料表面温度与材料内部温度差加大,且温度场分布趋于缓慢.图 4<sup>[6]</sup>给出了激光作用范围下不同扫描速度(作用时间)的关系,此实验结果定性地与上述理论分析相符合.

从图 3 还可以看到,随时间增大,温度场升高,但温度升高的速度渐趋平缓,即随时间增大,表层温度场的升高趋于饱和,其温度与时间的变化关系如图 5 所示.产生以上现象,是因为所研究对象是半无穷大金属热导体,其热容量可视为无穷大,在激光作用时间有限情况下,材料吸收的能量一定,其能量在金属内扩散关系为  $Q \propto Q_0 e^{-\alpha z}$  ( $\alpha$  为扩散系数  $0.15 \text{ cm}^2/\text{s}$ ,因为金属材料的扩散系数  $\alpha = K/C$  较大,因此,热量在材料内部扩散较快,在某一时间上材料吸收的能量与其扩散能量趋于平衡.

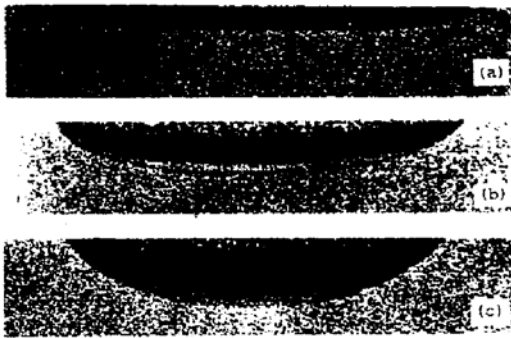


Fig. 4 Cross-section of hardened zone with constant surface temperature,  $1400^\circ \text{C}$  (laser power:  $3 \text{ kW}$ )  
(a)  $70 \text{ cm/min}$  (b)  $35 \text{ cm/min}$  (c)  $25 \text{ cm/min}$

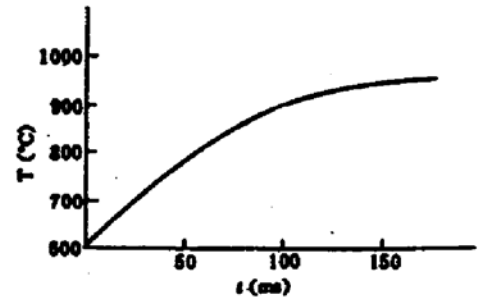


Fig. 5 Temperature distribution vs interaction time

### 3.3 激光功率密度对温度场分布的影响

从上一个问题知道,激光作用时间短,温度场分布较均匀,但减小激光作用时间,能量密度减小,因此,这会产生因能量密度不足,材料吸收能量后,温度升高达不到工艺要求的问题.为了克服这一矛盾,可以在减小激光作用时间的同时,增加激光功率密度,可保持能量密度不变.为此选取激光功率密度为  $2 \times 10^4 \text{ W/cm}^2$ ,作用时间为  $50 \text{ ms}$ ,  $\gamma = 2.94 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ ,其温度场分布如图 6 中曲线 b 所示.由图可以看出,曲线 a 与曲线 b 其能量密度相同,都是  $10^3 \text{ J/cm}^2$ ,但曲线 b 激光作用时间是曲线 a 的一半,这样曲线 b 在不改变能量密度下,在材料表面形成一薄的均匀温度场分布层.这是因为 a、b 两曲线吸收相同的能量,但曲线 a 激光作用时间相对较长,热量向材料内部传导距离相对长一些,加之表面辐射能量损失,造成曲线 a 温度不均匀度相对加大,而曲线 b 激光作用时间相对短些,当材料吸收能量后,表面温度升高相对加快,这样在短的时间内温度传导距离相对减小,因此,材料表面温度与内部温度相差不大,温度场分布趋于均匀.

### 3.4 横向温度场分布

在激光功率密度为  $10^4 \text{ W/cm}^2$ ,激光作用时间  $t = 100 \text{ ms}$ ,光斑直径为  $5 \text{ mm}$ ,  $\gamma = 2.94 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$ ,分别计算横截面  $z = 0, 0.09, 0.34 \text{ mm}$  处的温度场,其分布如图 7 所示,由图中

曲线可以看出, 表面 ( $z = 0$ ) 温度低于 ( $z = 0.09$  mm) 处的温度, 这主要是由于材料表面热辐射和内部热传导引起的, 其结果与图 2 相符合, 横向温度场分布主要与激光束的能量分布有关.

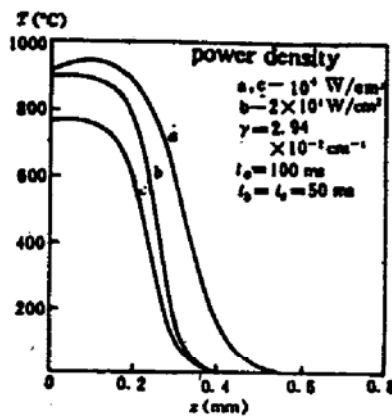


Fig. 6 The effect to the temperature distribution of laser power density

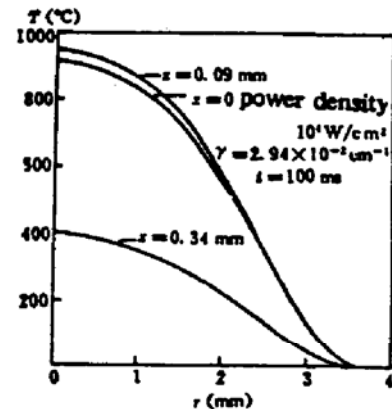


Fig. 7 Transverse temperature distribution

### 参 考 文 献

- [1] W. W. Duley, *CO<sub>2</sub> laser, Effects and Applications*, New York San Francisco London, Academic, 1976
- [2] W. W. Duley, *Laser Processing and Analysis of Materials*, New York, Plenum, 1983
- [3] Tapio T. Rantala Juhani Levospa, A numerical simulation method for the laser induced temperature distribution. *J. Appl. Phys.*, 1989, 65: 4475
- [4] G. Birhoff et al., *Alternation Direction Implicit Methods*, in *Advances in Computers*, New York, Academic, 1962.
- [5] C. Kumar, N. Patel, Carbon dioxide laser a journey from milliwatts to megawatts. *Proc. SPIE: CO<sub>2</sub> Laser and Applications*, 1989, 1042: 112
- [6] Isamu Miyamoto et al., Novel sharpening optics of CO<sub>2</sub> laser beam; LSV Optics-Principle and Applications. *Proc. SPIE: CO<sub>2</sub> Laser and Applications I*, 1990, 1276: 214

## Physical Analysis of the Laser-Induced Temperature Field

Wei Zaifu, Cha Hongkui Wang Runwen

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

(Received 4 June 1993; revised 2 July 1993)

**Abstract** A numerical simulation method for the laser-induced temperature distribution is presented, which is simple and general, without the usual limitations in analytical approaches. The dependence of temperature distribution on the material surface heat radiation, interaction time and power density of laser is analyzed. The numerical simulation results are considered to be consistent with practical cases.

**Key words** laser induce, numerical method, temperature distribution.