

文章编号: 1001-3806(2009)06-0622-04

3种吸收率模型的金属激光加热数值研究比较

陈彦北¹, 陆建^{1*}, 倪晓武¹, 徐立君², 张喜和²

(1. 南京理工大学理学院, 南京 210094; 2. 长春理工大学理学院, 长春 130022)

摘要: 为了比较单一常数吸收率模型、固态和液态吸收率分别为常数的组合吸收率模型以及温度相关吸收率模型对于数值结果的影响, 分别采用这3种吸收率模型建立了空间轴对称有限元计算模型, 模拟了激光加热铝板的过程, 对比了不同吸收率模型下的计算结果, 讨论了这几种吸收率模型的优劣和适用范围。结果表明, 对于固态和液态均明显存在的加热过程, 固态和液态阶段分别为不同常数的组合吸收率模型能得到与使用吸收率温度相关模型很相似的结果, 而使用单一的常数吸收率模型与之相比则差别较大; 对于加热区域为单一物态的加热过程, 使用单一常数吸收率模型与使用吸收率温度相关模型的计算结果有一定的差别, 但差别不大。

关键词: 激光技术; 激光加热; 吸收率; 有限元; 金属

中图分类号: O532+.25

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.018

Numerical simulation of laser heating of metal with three absorptivity models

CHEN Yan-bei¹, LU Jian¹, Ni Xiao-wu¹, XU Li-jun², ZHANG Xi-he²

(1. School of Science, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Science, Changchun University of Science & Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: There are three absorptivity models, i. e. the single constant absorptivity model, assembled constant absorptivity model whose liquid-state and solid-state absorptivity are both constant and temperature-dependent absorptivity models. In order to compare the influences of the three models on the numerical results, a spatial axis-symmetric finite element calculation model was established based on the three absorptivity models respectively. The laser heating process of an aluminum plate was simulated and the three numerical results were compared. The advantages and disadvantages and the application scope of the three absorptivity models were discussed. The results show that for the heating process of both solid state and liquid state existing evidently, the computed results based on the assembled constant absorptivity model are similar with those based on the temperature-dependent model. However, for the heating process of only one single physical state existing, the computed results based on the constant absorptivity model are a little different with those based on the temperature-dependent model.

Key words: laser technique; laser heating; absorptivity; finite element; metal

引言

在金属材料激光加热的研究中, 数值计算是一种重要的理论分析手段^[1-2]。而在进行数值分析时, 金属对激光的吸收率大小将决定激光能量的沉积速率, 会对计算结果有较大的影响, 因此是一个非常重要的计算参量。

影响吸收率的因素非常多, 除了激光波长具有显著的影响外, 与被作用金属材料的温度、入射角度、表面情况(粗糙度、氧化情况和有无涂层等)、表面物态(熔化和汽化)及金属成分等因素均有着密切的关系^[3], 甚至

对于同一试样进行重复加热时各次的吸收率也有较大差别^[4], 因而, 不同文献中给出的试验结果也往往有比较大的差别。目前确定材料吸收率主要有3类方法: 第1类是测量反射率, 一般装置复杂精密且有局限性; 第2类是通过测量热作用区域的几何尺寸进行间接评定, 仅适合于定性评价; 第3类是从量热角度, 通过测量材料的温度变化并进行相应的传热学计算而得到吸收率。这几类方法中, 第3类方法最为简便易行^[5]。而在实际应用中, 常常通过测量材料表面的定点温升并结合数值计算的手段来确定吸收率, 这种方法在原理上就属于上述第3类方法, 但是却显得更为方便、简洁和高效^[6-8]。

目前在有关激光加热金属的数值研究中, 多数都将吸收率作为单一常数对待, 但事实上随着辐照时间的增加和温度的上升, 金属的吸收率是不断变大的。为了研究在数值分析中不同吸收率模型对于数值计算

作者简介: 陈彦北(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事激光与材料相互作用机理的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2008-10-06; 收到修改稿日期: 2008-11-06

结果的影响,本文中分别使用单一常数吸收率模型、固态和液态吸收率分别为常数的组合吸收率模型(简称组合吸收率模型)以及温度相关吸收率模型对于铝板的激光加热问题进行有限元仿真计算,对比了不同吸收率模型下的计算结果。计算中在假设平均功率相等的前提下,模拟不同时空分布的波长为1.064μm的长脉冲激光对金属材料的加热过程,探讨了组合吸收率模型以及实际应用中常用的单一常数吸收率模型对于计算结果的影响,从而为激光加热研究中金属吸收率的处理提供参考。

1 理论模型

1.1 温度相关的吸收率模型

随着辐照时间的增加,金属的温度不断增加从而导致材料电阻率变大,吸收率也会随之增加。对于红外波段的激光,描述这种吸收率随温度的上升而增大的特性通常用到 Hagen-Rubens 公式,对于波长为1.064μm的 Nd:YAG 激光:

$$A(T)_{YAG} = 354.67 \sqrt{a + bT} \quad (1)$$

式中, a, b 为材料参量,对于铝(熔点为 933K)有:

$$A(T) = \begin{cases} 354.67 \times 10^{-4} \sqrt{-1.0 + 1.25 \times 10^{-2} T}, & (293K \leq T \leq 933K) \\ 354.67 \times 10^{-4} \sqrt{10.7 + 1.45 \times 10^{-2} T}, & (T > 933K) \end{cases} \quad (2)$$

1.2 几何模型

针对激光束垂直辐照金属板,入射光束为高斯光束的情况,使用柱坐标系建立了空间轴对称计算模型,如图1所示。其中, z 轴为对称轴, r 为半径方向, O 为

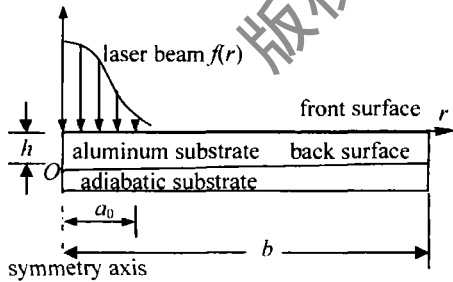


Fig. 1 Schematic diagram of calculational model of the aluminum plate irradiated by laser

样品前表面中心点,金属板厚度为 h ,半径为 b ,作用激光光斑半径为 a_0 。

为简化计算,做如下假设:(1)忽略对流及热辐射作用在边界上造成的热损失;(2)计算过程中未出现汽化;(3)没有发生严重的几何变形;(4)由于作用时间较短,因而忽略液相的流动,基体材料液化后仍将其作为热传导处理。

1.3 热传导理论及有限元求解

由于采用了柱坐标系,对于各向同性的均匀材料,伴随有相变过程的热传导方程实际上相当于有内热源的热传导方程:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \kappa \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} \quad (3)$$

式中, T 为温度; ρ, c 和 κ 分别表示密度、比热容和热导率; L 为融化潜热; f_s 为固相率^[9]。处理铝板受热过程中的固-液相变问题时,采用热焓法。焓值可描述为:

$$H = \int_{T_1}^{T_2} \rho c dT + \rho(1 - f_s)L \quad (4)$$

式中, H 和 L 分别为温度从 T_1 变化到 T_2 时的焓值和潜热。边界条件:

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = I_0 A(T) f(r) g(t) \quad (5)$$

式中, I_0 为中心处功率密度; $f(r) = \exp(-2r^2/a_0^2)$ 为激光脉冲的空间分布, a_0 为光斑半径; $g(t)$ 为激光脉冲的时间分布,对于连续激光,可以认为 $g(t) = 1$,对于重复频率激光有:

$$g(t) = \begin{cases} 1, & (n/\nu \leq t \leq n/\nu + \tau) \\ 0, & (n/\nu + \tau \leq t \leq (n+1)/\nu) \end{cases}, \quad (n = 0, 1, 2, \dots, \nu - 1) \quad (6)$$

即在有激光作用时间段内 $g(t) = 1$,脉冲间歇 $g(t) = 0$;这里 ν 为激光的重复频率; τ 为重复频率激光的脉宽,取 1ms。其它边界绝热。初始条件为:

$$T(r, z, t) \Big|_{t=0} = T_0; \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \Big|_{t=0} = 0 \quad (7)$$

式中, T_0 为计算时的初始温度,取 293K。计算时采用无条件稳定的欧拉向后差分法^[9],即有:

$$\left(\frac{[C]}{\Delta t} + [K] \right) \{T\}_{t+\Delta t} = \frac{[C]}{\Delta t} \{T\}_t + \{Q\}_{t+\Delta t} \quad (8)$$

式中, $[C]$ 和 $[K]$ 分别为比热矩阵和热传导矩阵; Δt 为时间步长; $\{T\}_{t+\Delta t}$ 和 $\{Q\}_{t+\Delta t}$ 分别为 $t + \Delta t$ 时刻温度和施加的热流矢量,右下标用来表示时间。若已知 t 时刻的温度值 $\{T\}_t$,就可以通过(8)式得到 $\{T\}_{t+\Delta t}$,这样从初始条件出发,依次可得到任意时刻的所有节点温度值。

2 计算结果和讨论

2.1 激光和材料参量

计算模型参见图1。取 $b = 0.05\text{m}$, $h = 0.002\text{m}$;作用的 Nd:YAG 激光波长为 1.064μm,光斑半径 $a_0 = 0.01\text{m}$;计算总时间取 1s,激光的重复频率平均功率均为 $P_0 = 21\text{kW}$,单脉冲脉宽 1ms,重复频率分别为 25Hz, 50Hz, 100Hz;材料的物理参量主要来自材料手册^[10],详见表1。

Table 1 Thermal parameters of the substrate material

physical state	density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	specific heat capacity /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	thermal conductivity /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	melting point /K	melting latent heat /($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
solid	$2769 - 0.22T$	$732.4 + 0.52T$	$237.9 + 0.02567T - 0.000059T^2$	933	3.87×10^5
liquid	2373	1178	$42.29 + 0.0656T - 0.000013319T^2$		

2.2 计算结果及分析

图2中给出了依据温度相关吸收率模型得到的不同频率的激光作用下材料后表面中心点的温升,图中

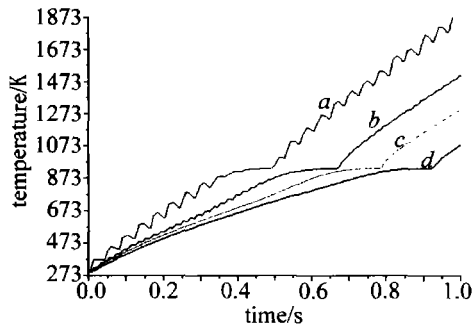


Fig. 2 Temperature history of the center point of back surface by using temperature-dependent absorptivity model

曲线 *a*, *b*, *c* 分别表示重复频率为 25Hz, 50Hz, 100Hz 的长脉冲激光作用时的曲线, 曲线 *d* 表示连续激光作用时的曲线。几条曲线均经历了一个平台期, 这是固-液相变期间吸收大量的能量造成的。由图2可见, 不同频率时基体材料的温升差别较大, 这反映了表面温升对后续激光能量沉积的影响, 即脉冲频率较小时, 单个脉冲的功率密度较大, 致使受激光辐照面迅速升温, 而表面这种高温状况反过来又会促进对后续激光能量的吸收, 因此, 会有更多的激光能量在前表面沉积, 从而造成更大的温升幅度。即便是对于同种金属, 在激光能量时空分布不同时, 只要考虑到金属吸收率是与温度相关的事实, 上述几种情况下采用吸收率为单一常数的模型显然就是不合适的。

对于多数金属而言, 液态吸收率都比固态吸收率大得多, 计算中将固态吸收率和液态吸收率分别作为常数对待, 在假定随温度变化的吸收率计算模型的结果为测试结果的前提下, 分别使用组合吸收率模型和单一常数吸收率模型并结合试错法对 25Hz 时的情况进行计算, 以便寻找并确定与假定的测试结果最为接近的吸收率。吸收率初始取值可参考下式进行加权平均:

$$\bar{A} = \int_{T_1}^{T_2} A(T) / (T_2 - T_1) dT \quad (9)$$

式中, T_1 和 T_2 分别为受辐照面温度的初始值和最大值。固态和液态吸收率调整为 0.088 和 0.219 的组合吸收率, 单一常数吸收率调整为 0.175 时, 得到了与假定的结果最为接近的温升。图3中给出了这3种模型定点温升结果的对比, 所取点均在金属基体后表面, 图中

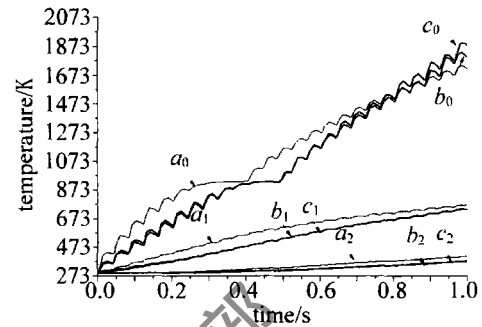


Fig. 3 Comparison of temperature histories of several fixed points in the three absorptivity models when the frequency is 25Hz

$a_0(a_1, a_2)$, $b_0(b_1, b_2)$, $c_0(c_1, c_2)$ 分别表示使用单一吸收率模型、组合吸收率模型、随温度变化的吸收率模型得到的定点温升, a_0, b_0, c_0 为后表面中心点温升曲线, a_1, b_1, c_1 为距离后表面中心点 1cm 处的温升曲线, a_2, b_2, c_2 为距离后表面中心点 2cm 处的温升曲线。可以看到, 后两种吸收率模型得到的温升曲线差异很小, 在图中几乎难以进行区分, 而单一吸收率模型则与其它两种吸收率模型得到的温升结果差异较大, 在 $t = 0.22\text{s}$ 时刻最大差异超过 30%。

经分析后认为, 使用组合吸收率模型时, 由于作用过程存在一段固液共存期, 调整固态和液态吸收率就能够调整激光的能量沉积速率, 从而找到一组合适的常数吸收率组合值使得计算结果与采用温度相关吸收率模型的计算结果相符合。对于其它频率进行类似的对比计算结果也是如此, 这里不再一一列出。

若计算过程中基体材料为单一物态, 不涉及固液共存, 上述 3 种计算模型就变为两种, 不再有组合吸收率模型。为了对比在这种情况下单一吸收率模型和随温度变化的吸收率模型对于温度场计算结果的影响, 对于平均功率为 17kW 的连续激光作用下铝板的温度

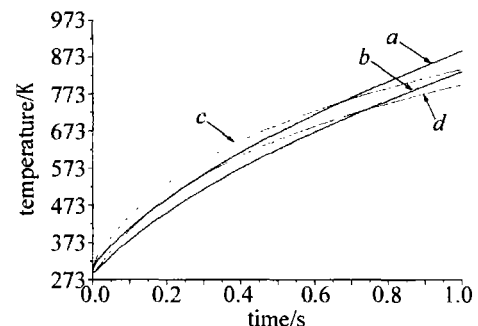


Fig. 4 Comparison of the temperature histories of several fixed points when the CW laser power is 17kW

场进行了计算,此时的计算过程仅仅涉及固态。得到的几个定点的温升历史曲线如图4所示。图中曲线a和曲线b分别表示在采用随温度变化的吸收率模型时得到的前、后表面中心点的温升。依据(9)式取平均吸收率,然后使用单一吸收率模型进行计算,得到前、后表面中心点温升曲线c和曲线d。对比后可见,采取单一常数吸收率模型可以得到与采用随温度变化吸收率模型得到相似的温升曲线,但温升曲线难以完全符合,不过差异相对较小。这是由于在物态为单相(仅为固态)时使用单一常数吸收率模型尽管可以调整总的沉积能量与随温度变化的吸收率模型相一致,但却难以调整能量沉积的速率也与之一致,因此,使得温升的历史曲线有一定差异。

3 结论

分别使用这3种吸收率模型对于铝板的激光加热问题进行有限元仿真计算,对比了不同吸收率模型下的计算结果。结果表明:对于固态和液态均明显存在的加热过程,固态和液态阶段分别为不同常数的组合吸收率模型能得到与使用吸收率温度相关模型很相似的结果,而使用单一的常数吸收率模型与之相比则差别较大;对于加热区域为单一物态的加热过程,使用单一常数吸收率模型与使用吸收率温度相关模型的计算结果有一定的差别,但差别不大。

在这3种吸收率模型中,拟合温度相关的吸收率当然是最理想的,但通过试错来对其进行确定很困难。对于固态和液态均明显存在的加热过程,使用组合吸收率模型分别确定固态和液态阶段的常数吸收率要方便得多,并且能得到与使用吸收率温度相关模型很相似的结果,而使用单一的常数吸收率模型与使用吸收率随温度变化的吸收率模型相比则差别较大,因此,此种情况下使用组合吸收率模型既能比较方便,又能得

到较好的结果。对于加热区域为单一物态的加热过程,使用单一常数吸收率模型与使用吸收率温度相关模型的计算结果有一定的差别,温升过程难以完全一致,但差别不大,基本能反映出温升过程。

此外,金属吸收率随温度的变化在加热过程上会表现为吸收率随时间发生变化,若能够拟合出一个随时间变化的吸收率也是一种比较合理的方法。

参 考 文 献

- [1] SHEN X F, WANG Y, YAO J, *et al.* Finite element simulation of thermal stress distribution in direct metal laser sintering [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(4): 343-346 (in Chinese).
 - [2] LONG R Sh, LIU W J, SHANG X F. Numerical simulation of temperature field on laser metal deposition shaping [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(4): 394-396 (in Chinese).
 - [3] LU J, NI X W, HE A Zh. Interaction physics between laser and materials [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1996: 19-22 (in Chinese).
 - [4] ZUO T Ch. Laser materials processing of high strength aluminum alloys [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 20-21 (in Chinese).
 - [5] LIN X Ch, SHAO T M. Lumped method for the measurement of laser absorptance of materials [J]. *Acta Physica Sinica*, 2001, 50(5): 856-859 (in Chinese).
 - [6] ZOU D N, LEI Y P, LIANG G Y, *et al.* Determination of laser absorptivity of metal by numerical calculation technique and trial-and-error method [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(7): 737-740 (in Chinese).
 - [7] HUANG Y L, YANG F H, LIANG G Y, *et al.* Using in-situ technique to determine laser absorptivity of Al-alloys [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(5): 449-453 (in Chinese).
 - [8] CHEN W L, YANG Y Ch, LEE H L. Estimating the absorptivity in laser processing by inverse methodology [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 190(1): 712-721.
 - [9] KONG X Q. The application of the finite element method in heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 1998: 204 (in Chinese).
 - [10] FANG K F. Handbook of engineering materials (volume: nonferrous metal) [M]. Beijing: Beijing Publishing House, 2002: 580-585 (in Chinese).
-
- (上接第621页)
- [6] FRY A R, FITCH M J, MELISSIONS A C, *et al.* Laser system for the TTF photoinjector at FERMILAB [C]//Particle Accelerator Conference, 1997. Vancouver, BC, Canada: IEEE, 1998: 2867-2869.
 - [7] LU X Y, LIN L, ZHAO K, *et al.* Drive laser system of a high average current photocathode electron gun in PKU [J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2004, 28(8): 881-884.
 - [8] IGOR K. High power mode-locked diode-pumped picosecond laser [M]. Switzerland: User Manual, Time-Bandwidth Ltd, 2002: 6-7.
 - [9] IGOR K. Timing stabilizer feedback system accessory [M]. Switzerland: User Manual, Time-Bandwidth Ltd, 2002: 18-20.