

文章编号: 1001-3806(2004)05-0543-04

## 激光热处理中光束参数表述问题研究

桂进斌, 马 琨, 楼宇丽, 李俊昌  
(昆明理工大学, 昆明 650093)

摘要: 利用 86.5% 环围功率法研究不同类型的激光器的等效高斯光束半径。并结合热处理实验, 采用任意分布光束热作用快速计算的数学工具对热作用结果进行比较研究。最后, 对激光热处理中光束参数表述问题进行了研究。

关键词: 激光束半径; 温度场计算; 激光热处理; 光束参数

中图分类号: O435; TG156.99 文献标识码: A

### Study of beam parameters expression in laser heat treatment

GUI Jin-bin, MA Kun, LOU Yu-li, LI Jun-chang

(Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The radiuses of equivalent Gaussian beam of different kinds of lasers are studied by using 86.5% loop enclosing power method. Combining with the experiments of heat treatment, heat action results are compared by using fast calculation math tool of heat action of arbitrarily distributed beam. The question of beam parameters expression in laser heat treatment is also discussed.

**Key words:** laser beam radius; calculation of temperature field; laser heat treatment; beam parameter

### 引 言

在激光对材料表面热处理的应用研究中, 实际光束的分布十分复杂, 材料的热物性参数是温度的函数, 理论计算激光与材料相互热作用是一个复杂的课题。为简化研究, 人们通常根据激光热处理的特点采用如下两种近似: 其一, 由于激光对材料辐照时间通常较短, 热影响区局限于光束扫描带邻近区域, 将被处理对象视为热物性参数为常量的半无限大连续介质, 利用热传导方程研究激光对材料辐照的热作用; 其二, 利用 86.5% 环围(桶中)功率法<sup>[1]</sup>, 确定出光束的等效高斯光束半径<sup>[1, 2]</sup>, 作为对所使用的光束描述的一个重要参数。基于上述原因, 在研究激光与材料相互热作用的过程中, 许多学者在表述热处理工艺时, 对于作用光束只给出激光功率、光束半径、离焦量、扫描速度等几个参数<sup>[3~5]</sup>。

应该指出的是, 随着激光技术的进步, 为便于比较不同形式的激光设备输出光束的质量, 建立一些较规范描述光束的分布及发散特性的参数是非常必要的。例如, 除了激光束宽及 86.5% 环围功率法对光束半径的定义外, 还流使用  $M^2$  因子来对光束的发散特性进行描述<sup>[1, 2]</sup>。然而, 如果在实际应用研究中不加分析地将光束理想化, 就存在让理论研究结果较大地偏离实际的危险。例如, 如果只给出光束半径而不作任何说明, 通常情况下, 人们只能将光束视为是基横模高斯光束。当光束是基横模高斯光束时, 利用热传导方程可以导出便于计算的温度场表达式<sup>[2]</sup>, 许多文献中都习惯采用这个公式来描述激光对物质的热作用<sup>[6, 7]</sup>, 事实上, 这种处理常常带来较大的误差。鉴于任意分布光束热作用温度场可以采用快速傅里叶变换方法进行快速计算<sup>[2]</sup>, 因此, 本文将利用快速计算方法, 以接近基横模输出的 YAG 激光器和高阶模输出的 HJ-3 千瓦级 CO<sub>2</sub> 横流激光器为研究对象, 同时对两种设备实际输出的光束及通过环围功率法确定的它们的等效高斯光束的热作用进行计算, 并将计算结果和热处理实验结果比较。通过比较, 对激光热作用研究中光束参数的表述问题进行讨论。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60178004); 云南省自然科学基金资助项目(2000F0042M)

作者简介: 桂进斌(1974), 男, 硕士研究生, 从事激光与材料热作用研究。

E-mail: jinbingui@163.com

收稿日期: 2003-09-27; 收到修改稿日期: 2003-11-08

# 1 光束半径定义

## 1.1 基横模高斯光束半径的定义

基横模高斯光束是一种轴对称光束。在直角坐标中, 设光束的对称轴为  $z$  轴, 则任意给定的垂直于  $z$  轴的平面上的激光功率密度分布可由下式定义:

$$p(x, y, z) = \frac{2P_0}{\pi w^2(z)} \exp\left[-2 \frac{x^2 + y^2}{w^2(z)}\right] \quad (1)$$

式中,  $w(z)$  为高斯光束半径, 其物理意义为光束横截面上振幅减小到中心值的  $1/e$  处到光束中心的距离<sup>[8]</sup>, 或光功率密度下降为中央功率密度的  $1/e^2$  时观测位置到光束中心的距离。理论分析已证明<sup>[2]</sup>,  $w(z)$  为半径的区域内的功率与光束总功率之比为 86.5%, 这为实际光束半径的定义提供了重要参考。

## 1.2 实际光束半径定义

实际应用中, 激光光束通常不是理想的基模高斯光束, 对光束半径的定义通常采用 86.5% 环围(桶中)功率法和二阶矩方法<sup>[1]</sup>。下面对要研究的 86.5% 环围(桶中)功率法作简要描述。

由于实际光束一般不具备轴对称性, 只有对光束中心定义后才能讨论光束半径。一种较严格的定义是一阶矩定义: 按照光束的功率密度分布求出其重心。数学上表示为<sup>[1,2]</sup>:

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} xp(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) dx dy} \quad (2)$$

$$\bar{y} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} yp(x, y) dx dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) dx dy} \quad (3)$$

式中,  $p(x, y)$  为激光横截面的功率密度分布。设光束总功率为  $P_0$ , 确定光束中心 $(\bar{x}, \bar{y})$  后, 以该点为中心, 容纳整个光束功率 86.5% 的圆形区域的边界到中心的距离就定义为光束的半径。这就是实验测定常用的 86.5% 环围功率法。

## 2 热作用计算公式

在半无限大材料上建立直角坐标  $x-y-z$ , 材料表面为  $x-y$  平面,  $z$  指向材料内部。  $t=0$  时刻功率密度为  $p(x, y)$  的激光照射到材料表面, 此后激光以速率  $v$  沿  $x$  正向扫描运动。引入材料表面对光能的吸收系数  $\rho_0$  后, 激光辐照温度场可表为<sup>[2]</sup>:

$$T(x, y, z, t) - T_0 = \int_0^t dt' \frac{\rho_0 \exp[-z^2/4\alpha(t-t')]}{4\kappa\sqrt{\alpha/\pi}(t-t')^{3/2}} \times \iint_{-\infty}^{\infty} p[x' - vt', y'] \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2}{4\alpha(t-t')}\right] dx' dy'$$

式中,  $\alpha$  为材料的热扩散系数,  $\kappa$  为导热系数,  $T_0$  为初始时刻材料的温度。

令  $x = vt + \xi, y = \eta, z = \zeta$ , 将问题移到与光束共同运动的动坐标  $\xi\eta\zeta$  中进行研究后, 上式可以通过傅里叶变换表为<sup>[2]</sup>:

$$T(\xi, \eta, \zeta, t) - T_0 = \rho_0 \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[p(\xi, \eta)] \times \mathcal{F}[Q(t, R, \xi, v, \alpha)]\} \quad (5)$$

式中,  $Q(t, R, \xi, v, \alpha) = \frac{1}{2\pi\kappa R} \exp[-\alpha(\xi + R)] U(t, R, v, \alpha); 2\sigma = v/\alpha R = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2}; U(t, R, v, \alpha) = \frac{R}{\sqrt{\pi}} \exp(R\sigma) \int_{v/\sqrt{\alpha}}^{\infty} \exp\left[-\frac{R^2\tau^2 - \sigma^2}{\tau^2}\right] d\tau$ 。

给定激光功率密度分布及材料的热物性参数后, 利用快速傅里叶变换技术以及运动坐标与静止坐标的变换关系, 即可对任意时刻材料内部的温度场进行计算。以下用接近基横模输出的 YAG 激光器和高阶模输出的 HJ3 千瓦级 CO<sub>2</sub> 横流激光器为研究对象, 根据实验参数, 同时对两种设备实际输出的光束及通过环围功率法确定的它们的等效高斯光束的热作用进行计算; 然后, 利用  $A_{c1}$  为界的相变模型<sup>[2]</sup>, 给出相变硬化带的模拟研究与实际测量的比较实例。并与实际热处理实验结果比较。

## 3 理论计算与试验验证

实验使用图 1 所示长方体工件,  $t=0$  时刻, 激光光束中心在  $x=0$  位置。激光淬火后在  $x=d_x$  处剖开, 因此, 在计算时取时间参数  $t = (d_x + d_r)/v$ ,  $d_r$  为等效光束半径。经验证, 剖面处光束中心到最近边界的距离大于  $3\sqrt{\alpha t_m}$ , 其中  $\alpha$  为热扩散系数,  $t_m$  为等效作用时间, 定义为光束直径与扫描速度之比, 工件可视为半无限大体并利用快速计算方法求解<sup>[2]</sup>。

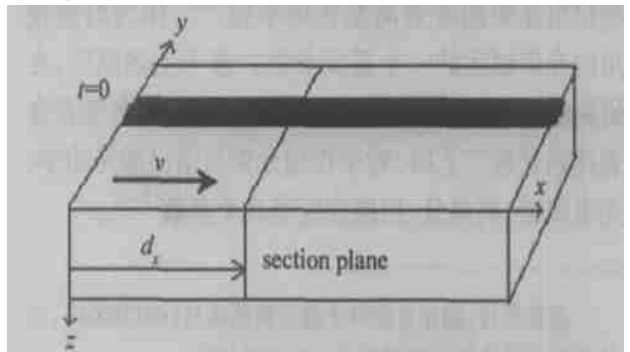


Fig. 1 Workpiece of experiment

### 3.1 实验设备 1

YAG 激光器  $\lambda = 1.06\mu\text{m}, P_0 = 1000\text{W}$ , 光斑观测区域尺寸为  $13\text{mm} \times 13\text{mm}$  (实际测量的功率密度分布如图 2b 所示, 图 2a 在同一标度下给出利用 86.5% 环围功率法确定的等效高斯光束分布)。

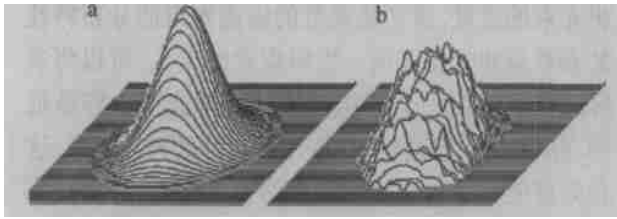


Fig. 2 Power density distribution (YAG laser)  
a—equivalent Gaussian beam b—actual laser beam

材料是 X35<sup>#</sup> 钢(法国钢种, 含碳量约 0.35%), 导热系数  $k = 0.041 \text{ W} \cdot (\text{mm} \cdot \text{K})^{-1}$ , 热扩散系数  $\alpha = 9.1 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , 表面吸收系数为  $\rho_0 = 0.62$  (实际测量)。

工件尺寸为长 100mm, 宽 60mm, 高 10mm, 光束沿  $x$  方向以速率  $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  扫描, 如图 1 所示。使用图 2 所示功率密度分布及相关实验参数, 利用(5)式模拟激光温度场及硬化带, 结果见图 3。图中,  $e$  为硬化带区域深度,  $L$  为扫描带宽度,  $\delta_L$  和  $\delta_e$  分别表示  $L, e$  与实验测量值的相对误差(%)。在  $d_x = 40 \text{ mm}$  处进行剖面金相处理, 得实验结果如图 4 所示。

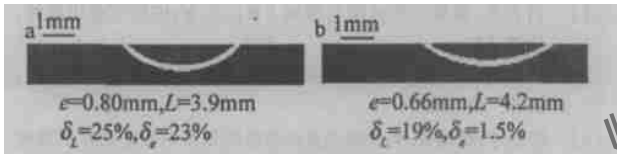


Fig. 3 Simulation of the hardened zone(YAG)  
a—equivalent Gaussian beam b—actual laser beam



Fig. 4 Result of experiment(YAG)

### 3.2 实验设备 2

HJ-3kW 级 CO<sub>2</sub> 激光器  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ,  $P_0 = 800 \text{ W}$ , 光斑观测区域尺寸:  $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$  (测量得功率密度分布见图 5b, 图 5a 在同一标度下给出利用 86.5% 包围功率法确定的等效高斯光束分布); 扫描速度  $v = 8 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

材料是 45<sup>#</sup> 钢, 导热系数  $k = 0.02649 \text{ W} \cdot (\text{mm} \cdot \text{K})^{-1}$ , 热扩散系数  $\alpha = 4.2 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  [9], 表面黑化层吸收系数  $\rho_0 = 0.5$ 。

工件尺寸为长 80mm, 宽 20mm, 高 10mm, 光束沿  $x$  方向扫描(参见图 1)。

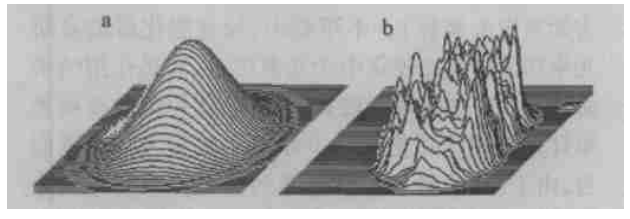


Fig. 5 Power density distribution (HJ-3)  
a—equivalent Gaussian beam b—actual laser beam

用图 5 所示光束及相应实验参数模拟激光温度场及相变硬化带, 结果见图 6。在  $d_x = 20 \text{ mm}$  处进行剖面金相处理, 得热作用实验结果见图 7。

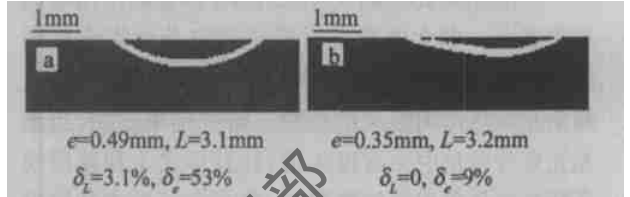


Fig. 6 Simulation of the hardened zone(HJ-3)  
a—equivalent Gaussian beam b—actual laser beam



Fig. 7 Result of experiment(HJ-3)

### 3.3 结果分析

从图 3 可以看出, 虽然 YAG 激光器的输出光束和其等效高斯光束的功率密度分布形貌比较接近(参见图 2), 但二者的热作用效果还是有明显的差异。对于 HJ-3 型激光设备输出的光束, 其差别则更为显著。为便于进一步分析引起差异的原因, 图 8a 和图 8b 分别给出了这两种光束与其等效高斯光束的平行于  $y$  轴的中截面功率密度曲线的比较( $\bar{x}, \bar{y}$ )

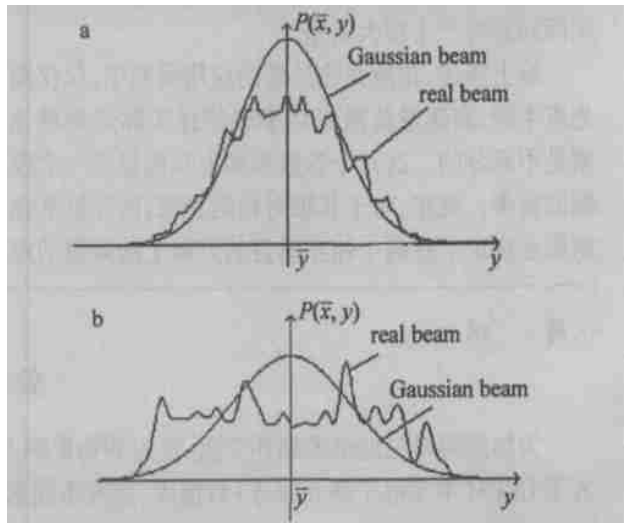


Fig. 8 Curves of beam section  
a—YAG laser b—HJ-3 laser

为光束中心坐标)。不难看出,经理想化后的高斯光束功率密度比较集中于光束中心,其热作用结果必然导致中央区域有较高的温度,利用等效高斯光束计算的相变硬化带中央厚度必然较大。相较而言,由于 HJ 3 型 CO<sub>2</sub> 激光器的输出光束分布和等效高斯光束有较大差别,利用等效高斯光束对热作用计算结果更偏离实际测量是必然的结果。

#### 4 讨论与结论

在激光热处理的实际工作中,影响热作用的因素很多<sup>[2]</sup>。本文中重点讨论在其它条件完全相同的情况下,实际光束和利用桶中功率法得到的等效高斯光束热作用效果的差别。研究结果表明,当激光光束分布是中央有极大值,并且形式上和基横模高斯光束分布相似的情况时,将光束等效为基横模高斯光束进行热作用计算还是可行的(如 YAG 激光器输出光束计算相变硬化带平均误差约为 20%)。容易证明,将本文中讨论的 YAG 激光器输出光束视为 TEM<sub>00</sub>+TEM<sub>01</sub> 按某种比例的强度叠加的模式<sup>[10]</sup>,可以进一步减小理论计算与实验测量的误差。然而,如果激光光束分布呈复杂高阶模分布,利用 86.5% 环围(桶中)功率法将光束等效为高斯光束后,激光热处理温度场计算将和实际结果有较大的误差(如 HJ 3 型激光器输出光束计算相变硬化带平均误差达 46% 左右)。理论及实验研究均表明,不同的激光设备,甚至同一设备的不同调节状况,例如激光谐振腔轻微失调,其输出光束的功率密度分布也会有很大的区别。因此,如果不加分析地用高斯光束来等效实际光束,并简单地使用理想化后的高斯光束的温度场计算公式来研究热作用,对实际问题将产生较大偏差。

综上所述,在激光热处理的应用研究中,仅仅用光束半径、离焦量及激光功率来描述实际热处理光束是不充分的。这几个参数事实上只能提供一个模糊的参考。现在,对于非轴对称的光束,国际标准化组织还规定了在两个相互垂直的方向上的束宽的定

义<sup>[1]</sup>。毫无疑问,为便于比较不同形式激光设备输出光束的质量,建立较规范地描述光束的分布特性的参数是非常必要的。按照束宽的定义,可以将实际光束近似为一个椭圆截面的高斯光束。容易证明,相较于将光束等效为一个圆对称的高斯光束,这种处理能够减少热作用计算误差。然而,对于热作用的定量研究,采用椭圆高斯光束近似后其误差通常还是难于满足实际要求。因此,在热作用研究中,从实际光束的分布出发,才能获得接近实际情况的结果。目前,为确定一个优化的热处理工艺,实际上总还是重新总结实验规律,对光束参数表述的不充分无疑是激光热处理工艺可重复性及可移植性差的一个重要原因。作者认为,在激光热处理的应用研究中,随着强激光测量手段的进步与普及,将到达材料表面的激光功率密度分布作为一个重要的工艺参数表述在研究文献中,才能较好地描述实际激光热处理工艺。如果条件允许,给出激光的复振幅表达式<sup>[1,2]</sup>将能对所使用的光束作较准确的表述。

#### 参 考 文 献

- [1] 吕百达. 强激光的传输与控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999. 67.
- [2] 李俊昌. 激光的衍射及热作用计算 [M]. 北京: 科学出版社, 2002. 222, 359, 411.
- [3] 陈君才, 曹建春. 铸铁激光表面改性的组织与性能特征的研究 [J]. 昆明理工大学学报, 1997, 22(4): 27.
- [4] 庄其仁, 张广珍, 吕凤萍. 模具表面的激光热处理研究 [J]. 中国激光, 2003, A29(3): 271~ 276.
- [5] 谢琼, 许振鄂. 激光加热三维瞬态温度场显示 [J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(7): 69~ 71.
- [6] 管一弘, 陈铁力, 陈劲波 *et al.* 激光相变硬化过程中温度场及马氏体相变的数值分析 [J]. 金属热处理学报, 1998, 19(4): 19~ 24.
- [7] 商全义, 彭竹琴, 弓金霞 *et al.* 灰铸铁激光表面处理硬化层的组织与性能 [J]. 中原工学院学报, 2002, 13(2): 1~ 4.
- [8] 吕百达. 激光光学 [M]. 成都: 四川大学出版社, 1992. 62.
- [9] 谭真, 郭广文. 工程合金热物性 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994. 52.
- [10] LI J Ch, MA K, FAN Z B. Power density distribution simulation and relevant heat effect calculation of a high power CO<sub>2</sub> laser with low order modes [J]. Chinese Journal of Laser, 2002, B11(5): 334~ 340.

• 简 讯 •

#### 公 告

为加速两岸三地学术期刊交流,扩大刊物影响力,本刊目前与台湾华艺数位艺术股份有限公司合作,加入了 CEPS(中文电子期刊服务)数据库,如有不同意入编者,请从速函告!

《激光技术》编辑部

2004年10月