

文章编号: 1001-3806(2012)04-0512-04

CO₂ 激光器功率分布的实验测量及数值模拟

吴钟壮¹, 伏云昌^{1*}, 刘洪喜², 张晓伟², 王传琦², 李俊昌¹

(1. 昆明理工大学 理学院, 昆明 650093; 2. 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093)

摘要: 为了获得大功率 CO₂ 激光功率分布的解析表达式, 采用热敏纸测量大功率 CO₂ 激光器在不同功率和高度时的激光功率分布, 用 MATLAB 软件对实验光斑进行图像处理, 建立了数学模型模拟激光功率分布, 并与采集光斑进行了比较。通过激光热处理实验及温度场计算验证激光功率分布模型, 取得的实验结果和理论计算相符合。结果表明, 采用热敏纸测量大功率 CO₂ 激光功率分布的方法是可行的。得到的功率分布的解析表达式可作为理论计算的条件, 具有一定意义。

关键词: 激光器; 激光功率; 激光热处理; 硬化带; 温度场模拟

中图分类号: TN248.2⁺2 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.04.020

Measurement and numerical simulation of the power distribution of CO₂ laser

WU Zhong-zhuang¹, FU Yun-chang¹, LIU Hong-xi², ZHANG Xiao-wei², WANG Chuan-qi², LI Jun-chang¹

(1. School of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: In order to obtain the analytic expression for CO₂ laser power distribution, the power distribution of a CO₂ laser was measured with thermal paper at the different heights and output power. The experiment images of the laser spot were processed with MATLAB, and a numerical model of laser power distribution was built up and compared with the experimental spot. The obtained analytic expression was verified with the measurement results in laser heat treatment experiments and calculation results of temperature field. The experimental results were in good agreement with the theoretical calculation. The results show that it is feasible to measure the laser power distribution with thermal paper, and it is practical to calculate the power distribution based on the analytic expressions.

Key words: lasers; laser power; laser heat treatment; belt of hardening; temperature field simulation

引言

近年来, 随着激光技术的不断发展, 激光热处理技术也越来越受到人们的关注, 在航空、军事、机械电子、材料表面热处理等工艺中都得到广泛的应用^[1-5]。激光热处理就是把激光作为光源照射在材料的表面, 材料表面加热区的金相组织发生了变化, 奥氏体转换为马氏体, 使材料表面硬化, 从而极大地提高了材料的硬度和强度^[6]。

激光热处理是许多物理现象和处理条件的耦合。影响激光热处理的重要因素之一就是激光功率分布。不同激光器的功率分布形式是不一样的, 同一台激光器在不同高度输出的功率分布也是不一样的, 这使得热处理结果会产生很大的变化。因此, 1 台大功率

CO₂ 激光器功率分布的测量是理论计算和实验研究的基础。通常情况是在已知实验参量及材料热物性参量条件下对温度场进行计算, 如 MAZUMDER 等人对激光材料热处理过程数值模拟有详细综述^[7]。在理论计算中, 多数将激光视为高斯基横模^[8-9], 但实际激光并不是高斯基横模。那么如何测量激光功率分布呢? 2009 年, 昆明理工大学引进了一台大功率 CO₂ 激光器, 为了得到该激光器在不同功率和不同高度下的激光功率分布, LI 教授提出激光扫描热敏纸的简易方法, 可以很好地测量出激光的功率分布^[10]。

作者采用参考文献 [10] 中的方法测量激光功率分布, 结合数字图像处理技术和数值计算, 获得功率分布的解析模型。(1) 采用热敏纸测量在不同功率和一定高度下的激光功率分布, 对实验采集的光斑应用 MATLAB 软件进行图像处理和分析; (2) 建立数学表达式, 在计算机上模拟激光功率分布模型并与采集光斑进行比较; (3) 应用有限元方法完成温度场的数值计算, 通过对硬化层的相貌及厚度和宽度的比较, 验证大功率激光功率分布的模拟模型。

基金项目: 昆明理工大学基金资助项目

作者简介: 吴钟壮 (1985-), 男, 硕士研究生, 现从事激光应用方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: fychang_box@hotmail.com

收稿日期: 2011-12-06; 收到修改稿日期: 2011-12-29

1 实验测量及数字图像处理

实验光路如图 1 所示,激光通过一个狭缝扫描热敏纸,图中 h_1 和 h_2 为激光光斑的两个不同采集平面的高度, w_z 是高度为 z 时激光的半径。实验中,改变 CO₂ 激光器输出功率和扫描速度,在不同高度下扫描热敏纸,获得热敏纸上的激光光斑。图 2 为同一平面上不同功率和一定扫描速度的热敏纸采集的激光光斑。

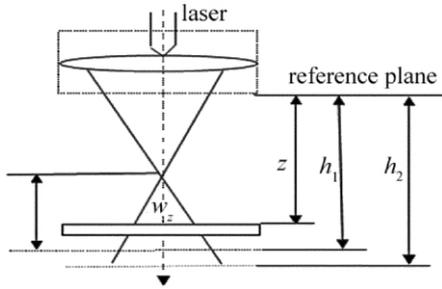


Fig. 1 Experiment scheme of sampling spot of laser

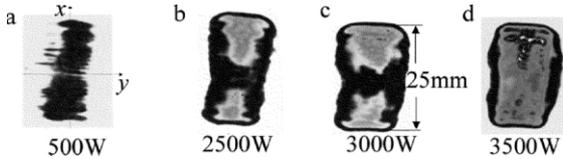


Fig. 2 Laser spots sampled on the thermal paper

观察图 2 可以发现,激光光斑基本上是对称的,两边的强度高于中间。扫描速度一定,功率过大将导致热敏纸被烧穿,见图 2d; 激光功率过低,导致在热敏纸上看不出光斑的变化,见图 2a。只有当激光达到热敏纸标准^[11]的反应温度时,才能引起热敏纸的变化。根据热敏纸的标准,选择合适的激光功率和扫描速度得到最为理想的光斑分布如图 2c 所示。

对热敏纸采集的光斑,通过 MATLAB 软件进行灰度及去噪声处理,取出其强度分布并进行分析。这里给出对图 2c 进行灰度和去噪声处理,得到的中心线的强度分布如图 3 所示,在图 3 中横轴表示长度,纵轴表示强度。

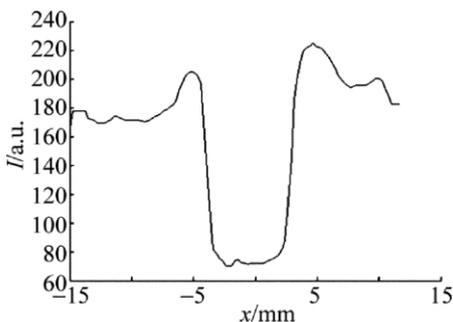


Fig. 3 Experimental intensity distribution along x axis

通过观察图 2c 及图像处理,得到在 (-12.5mm, 12.5mm) 即 25mm 之间的强度分布(见图 3),可以发

现光斑两边分布的强度要高于中间的强度,大致呈“U”型分布。在实验中难免会存在一些因素的影响,使得强度分布存在一些尖锐点。但是总体上对其结果影响不大,可以忽略不计。

2 激光功率分布的理论模拟

根据图 2c 中激光光斑分布的特点,同时由于实际激光并不是高斯基横模,因此经过反复尝试得出,将激光光斑视为几种模式的高斯基横模按比例合理的叠加,可以获得比较好的功率分布。下面采用高斯基横模^[12]按比例叠加的方法在计算机上应用 MATLAB 软件模拟激光功率分布模型。同时经过反复模拟调整,可以将激光功率分布的数值模拟表达式近似的表示为:

$$P_1(x, y, z) = \frac{P_0 G}{w_z^2} \left[\sum_{k=0}^6 E_k(x, y, z) \right] P(x, y, z) \quad (1)$$

式中 P_1 为激光功率宽度分布, P_0 为激光输出功率, G 为归一化常数, $a_0 \sim a_6$, $r_0 \sim r_6$, $r_2 \sim r_6$ 和 c 均为常数, w_1 是高度为 400mm 时的激光半径, $E_0(x, y, z) = a_0 \times$

$$\exp \left[-2 \frac{x^2 + y^2}{(c_0 w_z)^2} \right] \quad (a_0 = 1, c_0 = 0.2); E_1(x, y, z) = a_1 \exp \left[-2 \frac{x^2 + y^2}{(c_1 w_z)^2} \right] \quad (a_1 = 2, c_1 = 0.7); E_2(x, y, z) = a_2 \exp \left[-2 \frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - r_2 w_z)^2}{(c_2 w_z)^2} \right] \quad (a_2 = 2, c_2 = 0.15, r_2 = 0.46); E_3(x, y, z) = a_3 \exp \left[-2 \frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - r_3 w_z)^2}{(c_3 w_z)^2} \right] \quad (a_3 = 4, c_3 = 0.18, r_3 = 0.48); E_4(x, y, z) = a_4 \times \exp \left[-2 \frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - r_4 w_z)^2}{(c_4 w_z)^2} \right] \quad (a_4 = 4, c_4 = 0.50, r_4 = 0.78); E_5(x, y, z) = a_5 \exp \left[-2 \frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - r_5 w_z)^2}{(c_5 w_z)^2} \right] \quad (a_5 = 4, c_5 = 0.80, r_5 = 0.78); E_6(x, y, z) = a_6 \times \exp \left[-2 \frac{(\sqrt{x^2 + y^2} - r_6 w_z)^2}{(c_6 w_z)^2} \right] \quad (a_6 = 4, c_6 = 0.80, r_6 = 1);$$

$$P(x, y, z) = \exp \left[-\left(\frac{y}{c w_z} \right)^4 \right] \quad (c = 0.8); w_z \text{ 可以定义为 } w_z = w_1 \times \frac{z - 300}{100} \text{ (mm) 其中 } z = 500 \text{mm}, w_1 = 6.0 \text{mm}.$$

将以上等式归一化后代入(1)式,就可以模拟出较好的激光光斑分布。图 4 和图 5 就是作者在计算机上根据几种模式的高斯基横模按比例叠加的方法模拟出激光的功率分布,图 4 为投影平面强度图,图 5 为 3 维网格图。

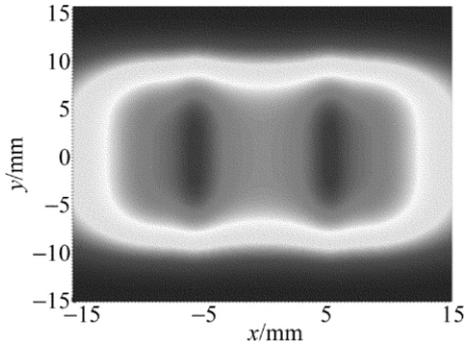


Fig. 4 Plane intensity distribution of laser beam

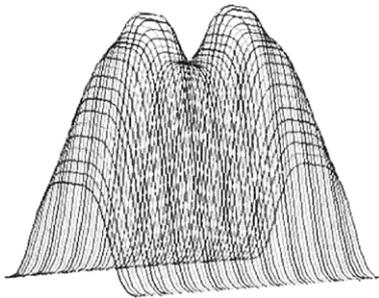


Fig. 5 3-D distribution of laser beam

在图5中,由于中间凹槽分布和两边分布重合在一起,难于显示出凹槽分布的情况。为了能够和采集光斑相比较,根据上述激光功率分布的数值模拟表达式,在计算机上应用 MATLAB 软件计算出 $y = 0$ 时的强度分布,如图6所示。

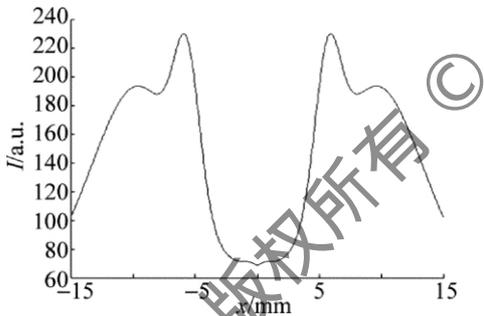


Fig. 6 Simulational intensity distribution of laser along x axis

通过观察计算得到在 $(-12.5\text{mm}, 12.5\text{mm})$ 即 25mm 之间的强度分布,由图6可以看出,理论模型光斑两边强度要高于中间强度,大致呈“U”型分布,与从采集光斑通过图像处理得到的强度分布图比较(见图3),可看出两者形状上基本一致,两边的强度都要高于中间的强度并呈“U”型分布,在一些细微地方两者有一些区别。产生细微差别的原因:一方面实验光斑是热敏纸采集的又经过图像处理提取的灰度分布,会带来误差,另一方面解析表达式要完全表达这些细节也是困难的。当然,这些细微差别对热处理的影响非常有限,主要还是功率分布整体轮廓和功率大小是关键因素。为验证解析表达式(1)式的可行性,作者完成了温度场理论数值计算,进行了材料表面硬化热处理实验,实验金相结果和理论计算硬化带相比较,表明

激光功率分布解析模型是合理的。

3 激光功率分布的理论实验比较

实验中用 45# 钢工件样本进行激光表面热处理实验。实验开始时工件的温度是逐渐上升的,当到达一定温度时,工件温度将趋于稳态,当激光离开工件时温度将上升后迅速下降冷却。因此,实验结束后将工件切割为 3 个区域:开始上升区域、中间稳态区域、结尾上升再下降区域。取出中间稳态分布区域进行研磨、抛光、浸蚀,在金相显微镜上采集工件的金相结构分布,得到的金相结构再与理论计算得到的硬化带相比较。

在激光表面热处理的理论计算中,由于开始和结尾时温度不是稳态分布的,因此必须知道工件的瞬态温度分布。在忽略空气对流和热辐射情况下,瞬态温度场的方程^[12]可以表示为:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \tag{2}$$

式中, ∇ 为拉普拉斯算子, α 为热扩散系数, T 为温度, t 为时间。边界条件是:

$$\begin{cases} \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\text{processing plane}} = \beta P(x, y, t) \\ T \Big|_{\text{other}} = T_0 \text{ 或者 } \kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{other}} = 0 \end{cases} \tag{3}$$

式中, $P(x, y, t) = P_1(x, y - vt)$, v 为激光移动速率, β 是工件表面的激光吸收系数, κ 是工件的热传导系数, n 为波线方向, T_0 为初始温度。边界条件(3)式指激光通过工件处理面进入工件。选取材料的热物性参量为: $\kappa = 41 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\alpha = 9.1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 计算工件的规格为 $100\text{mm} \times 30\text{mm} \times 6\text{mm}$ 。

采用有限元方法完成温度场数值计算,得到工件硬化带的分布图。图7和图8中分别给出激光功率为 1200W 、移动速率是 10mm/s 和吸收率为 0.6 的 45# 钢工件样本理论模拟硬化带分布和实验金相硬化带。瞬态温度场的数值变化表明工件开始加热时温度是逐步上升的,当温度上升到一定值后,工件的温度场趋于稳态分布,当激光走出工件时边界温度将上升,激光移出后迅速下降,这与实际情况是相同的。

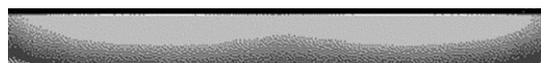


Fig. 7 Hardening distribution of the simulated workpiece



Fig. 8 Metallographic structure distribution of the workpiece in the experiment

通过比较图7和图8的分布情况,得出在形貌上它们的分布基本是一致的,表明两边的温度高于中间的温度。而且通过计算得出,模拟激光功率为 1200W

的硬化带宽度为 6.8mm,中间深度为 0.27mm。实验中得出功率为 1200W 的硬化带宽度为 6.7mm,中间深度为 0.24mm,相互比较得到它们之间的误差相差 10% 左右,表明解析表达式(1)式可以近似地描述实验用激光器的功率分布。由此可见,采用热敏纸测量激光功率分布,结合图像处理技术,获取光斑灰度分布,建立模型用计算机模拟,得到激光功率分布解析表达式是可行的。

4 结 论

通过采用激光扫描热敏纸的方法测量不同功率和高度的激光功率分布,在计算机上建立数学模型模拟激光功率分布,进行图像处理并与采集光斑相比较。同时,通过激光热处理实验及温度场计算验证激光功率分布模型,结果表明,此方法是可行的,得到功率分布的解析表达式可作为理论计算的条件,通过激光功率解析表达式可以预测工件硬化区域的分布情况。本文中给出的方法可以很方便用于大功率激光器功率分布的测量和理论模拟,具有一定实际意义,得到的激光功率分布解析表达式是后续实验工作和理论计算的依据。

本文中的实验工作在昆明理工大学先进材料成型实验室完成,作者致以诚挚感谢。

参 考 文 献

[1] LI J Ch. The research of optimizing control of laser heat treatment

[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 266(in Chinese) .

- [2] CHEN J, ZHANG Q L, YAO J H, *et al.* Influence of surface roughness on laser absorptivity [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6) : 624-627(in Chinese) .
- [3] QI H, CHEN T. Research of polymers used in fabrication of biochip [J]. *Laser Technology* 2005 29(2) : 138-141(in Chinese) .
- [4] QI H, MAZUMDER J, GREEN L, *et al.* Laser beam analysis in direct metal deposition process [J]. *Journal of Laser Applications* 2005, 17(3) : 136-143.
- [5] PANTSAR H, KUJANPA V. Diode laser beam absorption in laser transformation hardening of low alloy steel [J]. *Journal of Laser Applications* 2004, 16(3) : 147-149.
- [6] LIU Z Ch, REN H P, SONG Y Q, *et al.* Metal solid phase transformation course [M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 242(in Chinese) .
- [7] MAZUMDER J, MOHANTY P S, KAR A. Mathematical modelling of laser materials processing [J]. *International Journal of Materials and Product Technology*, 1996, 11(3/4) : 193-251.
- [8] LI J Ch, RENARD C, MERLIN J. Calcul des effets thermiques induits par un dispositif optique permettant de condenser un faisceau laser de puissance sur une tache rectangulaire [J]. *Journal De Physique III*, 1993, 3(1) : 1497-1508.
- [9] von ALLMEN M, BLATTER A. Laser beam interactions with materials: physical principles and applications springer series in materials science [M]. Berlin: Springer, 1995: 194.
- [10] LI J Ch. Simple measurement of power density distribution of high power laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1993, 20(2) : 93-97(in Chinese) .
- [11] TANG J B, ZHAO Ch Sh. The character and production requirement of thermal paper [J]. *East China Pulp & Paper Industry*, 2009, 40(2) : 26-30(in Chinese) .
- [12] LI J Ch. Diffraction of laser and calculation on thermal acting [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2008: 173-424(in Chinese) .