

激光功率和材料温度的涨落特性

魏学勤 郑启光 吴小刚* 辜建辉 李再光

(华中科技大学激光技术国家重点实验室, 武汉, 430074)

(* 华中科技大学图像信息处理与智能控制国家教委开放实验室, 武汉, 430074)

摘要: 研究了铜在 CO₂ 激光辐照下达到热平衡时表面的温度涨落。发现铜在达到热平衡后, 铜块表面温度出现涨落, 涨落的最大幅度不随幅照时间而改变。同时, 这一温度涨落也反映了国产 HGL-895 型 5kW 横流连续 CO₂ 激光器功率稳定性的一些问题, 对采用反馈电路稳定激光输出功率这一工艺有参考意义。

关键词: 连续 CO₂ 激光 温度 红外热像仪

Fluctuation characteristic of material temperature and laser power

Wei Xueqin, Zheng Qiguang, Wu Xiaogang*, Gu Jianhui, Li Zaiguang

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

(* Open Laboratory of Image Information Processing and Intelligent Control, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: The temperature fluctuation of copper surface, which was in a thermal equilibrium state under the irradiated condition with a CW CO₂ laser, was carefully measured. And the maximum range of the temperature fluctuation was no relation to laser irradiation time. So the temperature fluctuation of the copper surface showed considerably the laser power stability of 5kW CW transverse flow CO₂ laser. The result was useful to control the power stability of a CO₂ laser.

Key words: CW CO₂ laser temperature infrared thermal imagers

引 言

在激光应用领域, 激光输出功率涨落的影响一直是个难以解决的问题。不同的激光器, 功率涨落特性不同。有些涨落是由产生激光的物理机制决定, 如量子涨落, 这是一类固有的物理现象, 无法消除。还有一类涨落是由泵浦等外界因素的影响产生, 可以通过工艺、反馈机制及激光器运行参数调整等加以改善。

- 5 黄义春, 王祥林. 激光与红外, 1999; 29(3): 163~ 165
- 6 Mandelbrot B B The Fractal Geometry of Nature. San Francisco, CA: Freeman, 1982: 1~ 25
- 7 Pentland A P, IEEE Tran. Pattern Anal. Mach. Intell. PAMI 1984; 6(6): 661~ 674
- 8 Peitgen H O, Saupe D. The Science of Fractal Image. New York: Springer Verlag, 1988: 71~ 133
- 9 曹汉强, 朱光喜, 朱耀庭. 中国激光, 1998; A25(10): 945~ 949
- 10 Cao H Q, Zhu G X, Zhu Y T. SPIE Proc, 1999; 3637: 176~ 180
- 11 Ross F, Rhody A. Holography Marketplace. Sixth edition, Berkeley, CA: Ross Books, 1997: 7~ 31

作者简介: 曹汉强, 男, 1953 年 11 月出生。博士, 副教授。现从事计算机图像处理及其在激光全息防伪中的应用研究。

对固体激光器、半导体激光器,弛豫振荡会引起激光强度不规则的脉冲尖峰^[1]。这些尖峰的强度不规则,强度变化是一随机现象,对激光应用如激光打孔危害很大。对大多数气体激光器来讲,虽然不存在以上弛豫振荡现象,但泵浦等外界环境的影响也导致激光涨落。

激光涨落在激光应用中产生了有害的影响。在激光材料加工领域,激光功率涨落使激光加工工艺不稳定。如在激光切割中,切割面的粗糙度就和激光功率涨落有关^[2]。而在激光打孔中,激光器弛豫振荡引起的不规则尖峰结构导致孔的精度、表面质量以及打孔重复稳定性难以提高^[1,3]。在激光深熔焊接中,激光功率涨落有可能导致小孔的塌陷^[4,5]。在其它的激光应用领域,如激光全息记录,都存在激光涨落对它们的危害^[6]。因此,激光涨落对激光应用领域的各种影响,有待深入的研究。尤其在 CW CO₂ 激光材料加工领域,还没有一个对激光功率涨落引起的温度涨落的定量研究。在文献[7]中,考虑到激光功率涨落,在半无限大热源模型中引入噪声源,计算了材料在激光辐照下温度随时间的演化过程。发现随着物体升温过程温度涨落幅度增大。对低碳钢、环氧树脂和有机玻璃激光辐照下温度涨落的实验研究,发现确实存在这样的现象。但对于激光辐照材料达到热平衡的情况下,温度涨落的变化会如何,没有理论预言和实验研究,这是由于半无限大热源模型所计算的材料表面的温度和温度涨落随激光加热时间增加而无限制增加,显然和实际的情况不符。

铜在激光材料加工中属于难加工材料,这是因为铜的热传导率大,反射率高的缘故。然而,铜的这一特性却为研究激光辐照下材料在达到热平衡时的温度涨落变化提供了方便。在我们的实验中,在 CO₂ 激光辐照铜块的同时,用国产红外快速热像仪(HWRX-④型)测量了铜块表面的温度演化,发现温度是涨落的,涨落的最大幅度基本不随时间变化。通过快速傅里叶变换将温度变到频域观察,发现频域有最大峰值。

实验结果对国产 HGL-895 型 5kW 横流连续 CO₂ 激光器的负反馈控制系统的设计有帮助,此外,在激光材料加工中已发现材料激光加工后表面形貌和激光功率波动的频率有一定的联系^[2],因此,对材料加工工艺也有一定的意义。

1 实验条件

实验中用国产 HGL-895 型 5kW 横流连续 CO₂ 激光器辐照 150mm × 170mm × 4mm 的铜块,激光器输出功率在 650W 到 900W 之间,激光输出横截面为矩形。在激光辐照材料的同时,用红外快速热像仪(HWRX-④型)测量铜块表面激光辐照区内的温度分布及温度随时间的变化。红外快速热像仪的最小测量时间间隔为 0.04s,这一测量时间间隔对测量本次实验中铜块表面温度是足够的。

实验装置图如图 1 所示,激光器输出光束直接辐照靶材。光斑大小因其不规则而难以精确测量,约为 5.0cm²。

2 实验结果

2.1 铜块表面升温

铜的热传导系数为 4.01W/cm²·°C,热扩散率为 1.19cm²/s,而反射率达 99% 以上。因此,

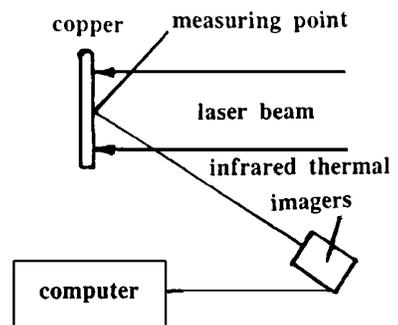


Fig. 1 The experimental arrangement

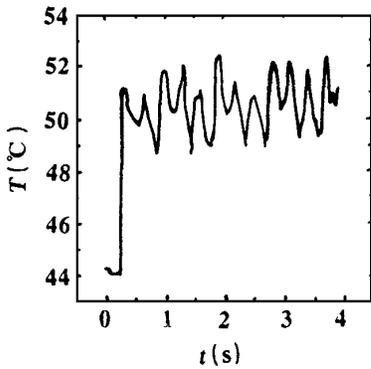


Fig. 2 The thermogram of copper surface which was illuminated by a CW CO₂ laser, the temperature sample interval was 0.04s and the range of laser power fluctuation was in 625~808W

激光功率的涨落引起。

2.2 铜块表面温度涨落的频域分析

激光功率的涨落一方面是个随机现象,另一方面又有一定的规律性。仅由图2和图3这样的温度变化图不能看出其规律性。故将铜块表面的温度涨落通过快速傅里叶变换变换到频域以寻找规律。图4和图5为激光辐照下铜块表面的温度涨落及其变换到频域后的频谱图。图4a和图5a中所示为温度涨落。图4b和图5b为频谱图,发现图中均出现最大尖峰。该尖峰对应的频率约为3.1Hz,这说明铜块表面的温度涨落有一定的周期性,该频率对应的周期约为0.32s。除了最大尖峰外,在图4b和图5b中,还有第二尖峰的存在。第二尖峰的频率约为1Hz,对应的周期为1s左右。3.1Hz和1Hz左右的频率在实验中是同等重要的。之所以第二尖峰低,

铜在激光辐照下,温度迅速上升而达到热平衡。正如图2中铜的温升曲线所示。在图2中,铜块的温度从激光辐照前的44°C左右迅速(在0.04s之内)上升至50°C左右,并达到热平衡。在热平衡的状态下,铜块表面的温度发生涨落,温度在48.5°C~51.5°C之间波动。这一温度涨落是由国产HGL-895型5kW横流连续CO₂激光器输出激光功率的涨落引起的。由于铜的热传导快,所以,铜块表面的温度涨落又基本上反映了该激光器的低频域功率涨落特性。

光斑中心处和边缘处任意一点的温度涨落示于图3中。从图中可以看到,中心和边缘点处温度涨落基本关联,边缘处由于激光功率低之故而温度较低。这也证明了实验中所测量的温度涨落确实是由

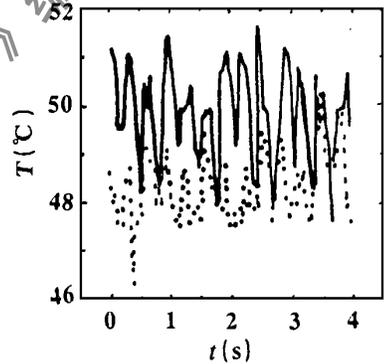


Fig. 3 The thermogram of copper surface which was illuminated by a CW CO₂ laser, the temperature sample interval was 0.04s and the range of laser power fluctuation was in 713~821W, the real line and dotted line show the temperature in center and edge area of laser spot respectively

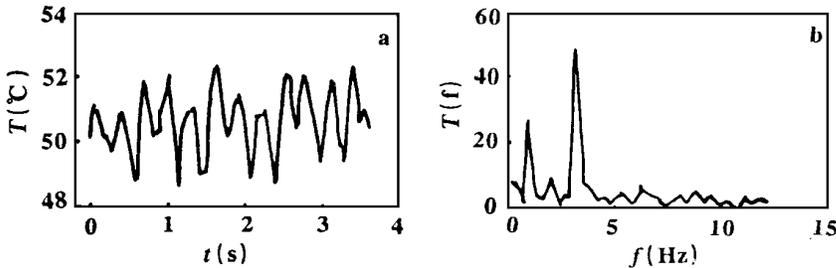


Fig. 4 a—the thermogram of copper surface(same as Fig. 2) b—Fourier transformation spectrum

是由于在铜块的温度测量中所测得数据有限,从而造成图4和图5中有限数据下0.32s的周期波动次数多

于 0.1s 为周期的波动之故。故通过傅里叶变换得到的频谱图中 3.1Hz 所对应的尖峰高于 1Hz 所对应的尖峰。由以上的分析以及图 4 和图 5 所示的温度波动图中, 可以看到温度波动既有一定的规律性, 又是一随机过程。温度波动有 0.32s 和 1s 左右两个周期, 体现了规律性。同时, 温度波动的幅度、周期和相位是一随机量, 满足什么样的统计性质目前尚不清楚。由图 4 和图 5 可判断周期围绕确定值涨落。图 4 和图 5 中的温度涨落基本上反映了激光功率涨落的情况, 可知激光功率涨落的过程非常类似于通信系统中常用的窄带随机过程^[8]。若用 P_0 表示平均激光功率, A 为涨落的幅度, 可以将激光器输出功率 $P(t)$ 随时间 t 的涨落用下式表示:

$$P(t) = P_0 + A \cos(\omega t) \quad (1)$$

式中, ω 为波动的频率。对于激光功率的波动来讲, A 和 ω 均为随机变量。从图 2~ 图 5 来看, ω 绕某一定值随机涨落, 可以粗略的用正态统计分布描述。 A 的情况比较复杂, 其统计规律难以确定。(1) 式中只考虑了一个波动频率的情况, 而在图 4 和图 5 中出现了两个主要的波动频率。此时, (1) 式可写成:

$$P(t) = P_0 + A \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) \quad (2)$$

式中, ω_1 和 ω_2 代表不同的波动频率。图 4 和图 5 中, ω_1 和 ω_2 分别围绕中心值 $\omega_{10} = 6.2\pi$ 和 $\omega_{20} = 2\pi$ 涨落。从图 4b 和图 5b 中还可看到其它的一些小尖峰, 与第一及第二尖峰相比, 它们的影响不是主要的。

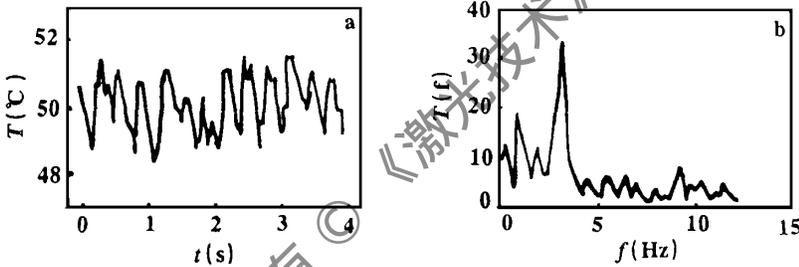


Fig. 5 a—the thermogram of copper surface(same as Fig. 3) b—Fourier transformation spectrum

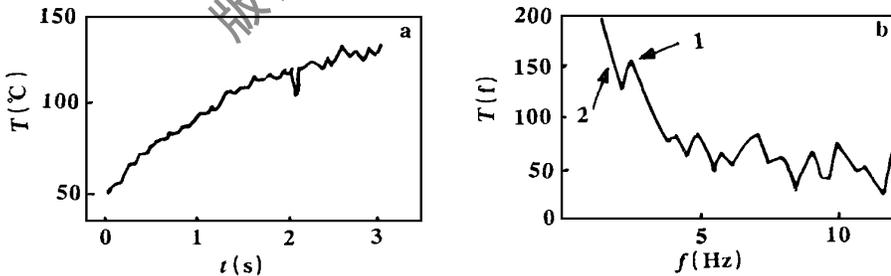


Fig. 6 The thermogram of the epoxy resin which irradiated by laser and its Fourier transformed frequency spectrum, the laser power is fluctuated between 23~ 57W, the measuring time interval, the measuring range and the resolution of the infrared thermal imagers are 0.04s, 12.94~ 320.66°C and 1.21°C respectively

不同的材料, 由于其热学参数不同, 在激光加热下温度涨落也不同。对于铜来讲, 热传导快, 激光功率涨落引起的温度涨落很明显。基本上激光功率的低频域涨落和铜的温度涨落在频率上一致。对其它类的材料来说, 如图 6 所示非金属材料环氧树脂, 在激光辐照下其表面温度的涨落中出现箭头 1 所指的 3Hz 左右的频率尖峰, 这一频率分量和激光功率涨落的频率分

量一致,说明是由激光功率涨落引起的温度涨落。图 6 中箭头 2 所指为直流分量,对应图 6a 中从 $t = 0\text{s}$ 到 $t = 3\text{s}$ 的升温过程曲线。

3 结 论

从以上实验结果可知,铜块在激光辐照下,迅速达到热平衡,其温度因激光功率涨落而出现涨落。这一温度涨落现象揭示了以下的几点。

(1) 铜在激光辐照下迅速达到热平衡后,温度涨落的最大幅度基本上没有随时间改变。如在图 2 中,温度一直在 $44\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动。而在图 5 中温度一直在 $48.5\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 51.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间波动。波动的幅度大小不同,是由于激光功率波动的幅度不同的缘故。在图 2 中激光功率波动的幅度为 183W 。在图 5 中激光功率波动的幅度为 108W 。

(2) 由于铜的热传导快,所以,铜块表面的温度涨落实际上也反映了国产 HGL-895 型 5kW 横流连续 CO_2 激光器输出激光功率的低频域涨落情况。由图 4 和图 5 中可以看到,铜块表面温度波动有两个频率峰值, 3.1Hz 和 1Hz 。这两个频率也是国产 HGL-895 型 5kW 横流连续 CO_2 激光器输出激光功率波动的两个主要低频域频率。这也建议在应用电路反馈系统稳定国产 HGL-895 型 5kW 横流连续 CO_2 激光器输出激光功率以消除功率波动时,反馈电路的反应时间必须小于 0.32s ,否则不起作用。

(3) 一般用脉冲激光加工铜。脉冲固体 YAG 激光器存在弛豫震荡引起的尖峰问题。由于铜对于激光功率的波动很敏感,激光功率的波动显然会引起温度波动,这对于铜的激光加工工艺会产生影响。这里还涉及激光功率波动的频率问题,不同的波动频率对铜的激光加工工艺影响的大小会有不同,这方面尚需进一步的研究。对其它材料来讲,激光功率的波动有可能在材料中引起相同或相近频率的温度波动,如环氧树脂。在激光切割中激光功率波动会引起加工表面出现波纹状起伏^[2]。而在激光深熔焊接中,激光功率的涨落可能引起小孔的塌陷^[4,5]。

(4) 铜块表面温度波动有两个主要的周期: 0.32s 左右和 1s 左右,但这两个周期也并非是完全确定,而是在一定的范围内随机涨落。其波动的幅度也是一随机量,所以,激光功率的波动是一随机过程。而激光功率的波动和涨落也是指同一现象。

参 考 文 献

- 1 王家金. 激光加工技术. 北京: 中国计量出版社, 1992: 66~ 69
- 2 李力钧. 现代激光加工及其设备. 北京: 北京理工大学出版社, 1993: 171~ 172
- 3 富崇大, 孙 莹, 李维君. 中国激光, 1982; 10(1): 20~ 25
- 4 Kroos J, Gratzke U, Simon G. J Phys D, 1993; 26(3): 474~ 480
- 5 Klein K, Vicanek M, Simon G. J Phys D, 1996; 29(2): 322~ 332
- 6 杨齐民, 张文碧, 吕小旭 *et al.* 激光杂志, 1994; 15(2): 49~ 53
- 7 魏学勤, 郑启光, 汪洪海 *et al.* 光学学报, 1999; 19(2): 206~ 210
- 8 王秉钧, 孙学军, 沈保锁 *et al.* 现代通信系统原理. 天津: 天津大学出版社, 1991: 39~ 41

* * *

作者简介: 魏学勤, 1972 年 1 月出生。博士研究生。从事激光与物质相互作用方面的学习和研究。