

文章编号:1002-2082(2006)SO-0037-04

热损失对连续波高能激光 能量测试结果影响的研究

黎高平, 于 帅, 杨鸿儒, 杨 斌, 王 雷

(西安应用光学研究所 国防科工委光学计量一级站, 西安 710065)

摘 要: 因激光照射时间可以达 30 s, 故用量热法测量连续波高能激光能量时, 传统热损失影响下得到的激光能量和实际激光能量之间存在着较大的差距。为此, 以量热式锥形吸收腔高能激光能量计为实验模型, 从理论上分析了热辐射、热传导及热对流对连续波高能激光能量测量的影响, 得出锥形吸收腔时间-温度关系曲线的数学模型, 并通过实验验证了该数学模型的正确性, 建立了相应的试验装置。用该数学模型对测量结果进行了最小二乘法拟合, 所得拟合曲线和实际曲线非常吻合。通过该数据处理模型对测量结果加以修正, 可使测量不确定度达到 1% 以内。

关键词: 连续波高能激光; 量热式激光能量计; 热损失; 锥形吸收腔

中图分类号: TN247; TB96-34

文献标志码: A

Study on effect of heat loss on energy measurement result of CW high energy laser

LI Gao-ping, YU Shuai, YANG Hong-ru, YANG Bin, WANG Lei

(Optical Metrology Laboratory, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The energy measurement result of CW high-energy laser, acquired by the calorimetric method and traditional data processing method, is influenced greatly by the heat loss as the laser pulse duration can be up to 30 s. The effect of heat loss (including heat radiation, thermal conduction and heat transfer) on energy measurement result of CW high energy laser is studied in this paper. An experiment setup and the mathematical model of time-temperature relation were built up, and the correctness of the mathematical model were verified by experiments. The temperature rising curve of the taper energy absorbing cavity according to the relative expression with a corresponding data processing model has been gained. Based on the mathematical model, the measurement result is fitted with the least square method and the fitted curve tallies with the practical curve quite well. The measurement result was corrected by the data processing model. The energy measurement result shows that the measurement uncertainty is within 1%.

Key words: CW high energy laser; calorimetric energy meter; heat loss; taper energy absorbing cavity

收稿日期: 2006-07-10; 修回日期: 2006-07-30

基金项目: 国防科技预研基金资助项目 (BZJ010103)

作者简介: 黎高平 (1966—), 男, 湖北省通城县人, 博士, 西安应用光学研究所研究员级高级工程师, 部级学科带头人, 主要从事光学计量与测试技术的研究工作。E-mail: gaopingl@xaonline.com

引言

碘化学激光器 (COIL, chemical oxygen-iodine laser) 及氟氘化学激光器 (DF, chemical fluorine-deuterium laser) 是目前最有希望的高功率、高能量、连续波激光光源。据文献报道,其最大输出功率可达 2 200 kW, 脉冲时间可达 40 s, 激光能量可达几十兆焦耳。目前国内外的激光能量计最大测量能量上限为 300 J, 标准接收口径仅为 $\phi 60$ mm, 而万瓦级功率计的响应时间最小为几分钟^[1-2]。因此, 无论用现有的功率计还是能量计都无法满足高功率和高能量激光器的要求。量热式激光能量计虽能解决这一问题, 但由于激光脉冲时间长, 用传统的数据处理方法^[3-4]将引入较大的测量不确定度。为此, 本文从理论上分析了热辐射、热传导及热对流对实验结果的影响, 得出了数据处理模型, 并通过实验验证了该数学模型的正确性。

1 实验装置及原理

激光能量吸收腔如图 1 所示。在腔的外延均匀绕上铂金电阻丝, 借助高精度电阻表测量吸收腔的电阻变化 $\Delta\Omega$ 就可得出吸收腔相应的温度变化 ΔT 。精确测量出该吸收腔质量和比热容就可得出相应的激光能量:

$$E = \frac{M \cdot c \cdot \Delta T}{\alpha(\lambda)} \quad (1)$$

式中: E 为进入吸收腔内激光的能量; M 为吸收腔的质量; c 为吸收腔材料的比热容; ΔT 为球体的温升; $\alpha(\lambda)$ 为吸收腔的吸收系数。

锥形吸收腔的角度为 30° , 激光平行入射到内表面时, 需经 6 次反射后才反射出来。能量计内表面的吸收率为 90%, 经过 6 次反射后从吸收腔逸出的能量可忽略不计, 因此, 我们可以近似认为 $\alpha(\lambda) = 1$ 。

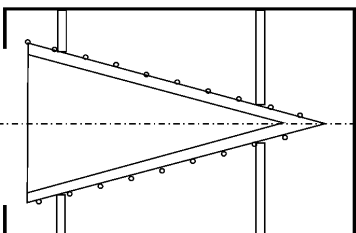


图 1 量热式激光能量计锥形吸收腔

Fig. 1 Taper absorbing cavity of calorimetric laser energy meter

用功率稳定的连续 YAG 激光器作激光光源, 用计算机控制步进电机的转动, 进而控制激光的透光时间 t ; 通过 Fluke 1529 电阻表测量锥形吸收腔外表面电阻丝的电阻随时间变化曲线。之后将锥形吸收腔式激光能量计放置在主光路上, 用计算机控制透光时间, 由此就可求出到达锥形吸收腔的激光能量:

$$E = Pt \quad (2)$$

2 实验结果与分析

借助计算机控制连续 YAG 激光的透光时间为 91 s, 使到达光锥的激光能量为 3 128 J。为便于数据处理, 对电阻随时间变化作长时间记录, 所得曲线如图 2 所示。

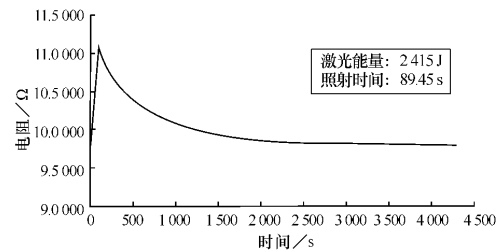


图 2 实验得到的电阻-时间曲线

Fig. 2 Curve of resistance vs time obtained in experiment

传统计算电阻变化的办法有 2 种: 一种是从测量得到的电阻-时间曲线中找出电阻的最大值和最小值, 两者之差便为电阻变化量; 另一种是将测量得到的电阻-时间变化曲线外延至激光脉冲起始位置, 并将该位置的电阻值定义为电阻的最大值。该值和电阻最小值之差为电阻的变化量, 通过变化量可得到对应的温升情况。2 种方法按(1)式计算得到的能量如表 1 所示。

表 1 2 种传统数据处理方法得到的激光能量

Table 1 The laser energy measurement results obtained by two different traditional methods

method	$\Delta\Omega/\Omega$	E/J	Relative Uncertainty/%
1	1.281 9	2 587	-17.3
2	1.656 8	3 343	6.8

由表可以看出, 用传统方法进行数据处理时, 由于处理方法不当会引入较大的相对不确定度。引起测量不确定度的主要原因是激光吸收腔的热辐射、热传导及热对流^[5]引起的热损失。下面就热损失各分量进行分析。

2.1 热辐射

由于锥形吸收腔及周围环境的温度高于绝对零度,因此,锥形吸收腔将向外辐射热能,同时吸收环境所辐射的热能。在 dt 时间范围内吸收腔由于热辐射所损耗的能量为

$$dE = s\sigma(T^4 - T_0^4)dt \quad (3)$$

式中: dE 为辐射损耗的能量; σ 为斯忒藩-玻耳兹曼; s 为锥形吸收腔的外面积; T 为锥形吸收腔的温度; T_0 为环境温度。

2.2 热传导

锥形吸收腔置于空气中时将向空气传递热量,同时通过隔热材料向外传递热量。

2.2.1 空气热对流方程

考虑锥形吸收腔向空气中传递热量,由导热微分方程可以得出笛卡儿坐标系中三维非稳态导热微分方程的一般形式^[6]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{\Phi} \quad (4)$$

式中 ρ , $\dot{\Phi}$ 及 t 分别为锥形吸收腔微元体的密度、单位时间内单位体积中内热源的生成热及时间。在此我们认为材料的导热系数为常数。由于铜的导热系数远大于铜和空气间的导热,故可忽略物体内部导热热阻。对(4)式积分可得到锥形腔的热辐射温度时间变化方程:

$$\frac{T - T_0}{T_s - T_0} = \exp(-\frac{hA}{\rho c V}t) \quad (5)$$

式中: T_0 是环境温度,也是锥形吸收腔最终所达到的温度; T_s 是锥形吸收腔所达到的最高温度,也是计算的初始温度; A 是锥形吸收腔的面积; V 是锥形吸收腔的体积。由此可以得到在 dt 时间内的传导热量:

$$\Phi = (T_s - T_0)hA \exp(-\frac{hA}{\rho c V}t) \quad (6)$$

2.2.2 隔热材料热传导方程

锥形吸收腔通过隔热性能较好的聚四氟乙烯圆筒将锥形吸收腔和外面的金属材料隔离开,尽管聚四氟乙烯的导热系数很小,但对测量会带来一定的影响。将(4)式变成圆柱坐标系,有关系式:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\lambda r \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi}(\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{\Phi} \quad (7)$$

可将聚四氟乙烯圆筒简化成导热系数为常数、无内热源、稳态的导热问题,导热微分方程(7)式可简化为

$$\frac{\partial}{\partial r}(r \frac{\partial T}{\partial r}) = 0 \quad (8)$$

锥形吸收腔所处边界条件的表达式为

$$r = r_1 \text{ 时, } T = T$$

$$r = r_0 \text{ 时, } T = T_0$$

对(8)式积分2次,并利用边界条件得到其温度分布式

$$T(r) = T + \frac{T_0 - T}{\ln(r_0/r_1)} \ln(r/r_0) \quad (9)$$

由此可得到单位面积的热损失

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} = \frac{\lambda}{r} \frac{T - T_0}{\ln(r_0/r_1)} \quad (10)$$

通过聚四氟乙烯圆筒的热流量为

$$\Phi = 2\pi r l q = \frac{2\pi \lambda l (T - T_0)}{\ln(r_0/r_1)} \quad (11)$$

2.3 热能损失方程

系统的热损失有热辐射、空气热传导及隔热材料热传导,利用(3)、(6)和(11)式可得出时间-温度的关系如下

$$\rho c V dT = s\sigma(T^4 - T_0^4)dt + (T_s - T_0)hA \exp(-\frac{hA}{\rho c V}t) dt + \frac{2\pi \lambda l (T - T_0)}{\ln(r_0/r_1)} dt \quad (12)$$

通过变换,(12)式可简化为

$$\frac{dT}{dt} = a_0 + a_1 T + a_2 T^4 + a_3 \exp(-a_4 t) \quad (13)$$

用(13)式的数学模型对测量得到的激光脉冲的锥形吸收腔温度随时间变化曲线进行最小二乘法拟合,拟合结果如图3所示。这样只要测量一段时间内锥形吸收腔温度随时间的变化曲线,便可得到锥形吸收腔的温度时间曲线。在图3所示的曲线中,从其初始位置分别选取 1 000 s, 2 500 s 和 4 000 s,根据三个时间段锥形吸收腔温度-时间变化曲线,按(13)式所示的数学模型进行最小二乘法拟合,电阻和激光能量数据如表2所示。

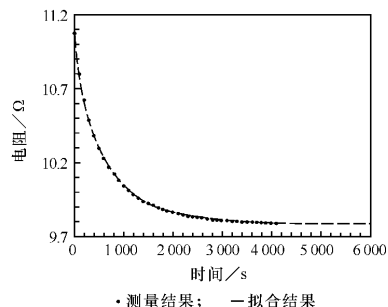


图3 时间电阻曲线拟合

Fig. 3 The curve of resistance vs time

表2 不同测量时间的拟合结果

Table 2 The fitting results with different measuring time

Time/s	$\Delta\Omega/\Omega$	measured result after revising/J	Uncertainty/%
1 000	1.524 3	3 076	1.7
2 500	1.525 8	3 079	1.6
4 000	1.521 0	3 069	1.9

由列表可以看出,借助测量结果进行热辐射及热传导修正,可使测量不确定度大大改善。

4 结论

本文对量热法测量连续波激光过程中热辐射、热对流及热传导引入的测量不确定度进行了较详细的分析。用建立起的实验装置测量了连续波激光照射锥形吸收腔后的温度随时间变化,并用最小二乘法进行了拟合,得到锥形吸收腔温度-时间数学模型。经该模型修正后,测量不确定度将大大改善。

参考文献:

- [1] CHAMBERLAIN George E, SIMPSON Philip A, SMITH Richard L. Improvements in a calorimeter for high-power CW lasers[J]. IEEE Trans Instrum Meas, 1978,IM-27(1):81-86.
- [2] SMITH Richard L, RUSSELL Thomas W. A calorimeter for high-power CW lasers[J]. IEEE Trans Instrum Meas. 1972,IM-21(4):434-438.
- [3] HEARD H G. Laser parameter measurements handbook[M]. New York: John Wiley & Sons Inc. 1968.
- [4] JOHNSON E J, Jr. Evaluating the inequivalence and computational simplification for the NBS laser energy standards[J]. Appl Opt, 1977,16(8):2315-2321.
- [5] 黎高平,王雷,杨照金,等.长脉冲高能激光能量测试技术的研究[J].光子学报,2004,33(9):1111-1114.
- [6] 霍尔曼 JP.传热学[M].马云良,译.北京:人民教育出版社,1997:1-6.