

基于量热法的高功率激光功率测试技术

付永杰 于东钰

Power measurement technology of high power laser based on calorimetric method

FU Yongjie, YU Dongyu

引用本文:

付永杰, 于东钰. 基于量热法的高功率激光功率测试技术[J]. 应用光学, 2024, 45(3): 522–528. DOI: 10.5768/JAO202445.0310005

FU Yongjie, YU Dongyu. Power measurement technology of high power laser based on calorimetric method[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(3): 522–528. DOI: 10.5768/JAO202445.0310005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高能高功率激光参数测量技术研究

Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser

应用光学. 2020, 41(4): 645–650 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0409001>

外腔半导体激光器在低高温下的机械形变与功率变化

Mechanical deformation and power change of external cavity semiconductor laser under temperature change

应用光学. 2021, 42(4): 586–591 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0401003>

基于可调谐飞秒激光的光学特性测量装置

Optical properties measuring device based on tunable femtosecond laser

应用光学. 2020, 41(4): 717–722 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0407005>

一种基于激光调制的高精度位移测量方法

High-precision displacement measurement method based on laser modulation

应用光学. 2018, 39(2): 230–234 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0203004>

长焦红外光学系统焦距的高精度测量技术

High-precision measurement of focal length for long-focus infrared optical system

应用光学. 2017, 38(6): 995–998 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0606002>

基于动态核主元分析的大功率LED阵列动态光源在线状态观测与故障诊断

On-line state observation and fault diagnosis of high-power LED array dynamic light source based on dynamic kernel principal component analysis

应用光学. 2021, 42(4): 728–734 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0403006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 03-0522-07

基于量热法的高功率激光功率测试技术

付永杰¹, 于东钰²

(1. 92493 部队计量测试研究所, 辽宁 葫芦岛 125000; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对高功率激光功率的测试, 尤其是高功率激光器烤机时的长时间测量需求, 设计了基于水冷却的激光功率测量方法。利用热敏电阻测量冷却水进水口和出水口的温差计算激光功率。利用有限元仿真软件建立了吸收腔热路结构的三维有限元模型, 并对不同口径的冷却水路进行模拟仿真。测试结果表明, 用该方法测试高功率激光功率, 测量相对误差可以保证在 1.6% 以内。

关键词: 光学计量; 高功率激光; 量热法; 长时间测量

中图分类号: TN249

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0310005

Power measurement technology of high power laser based on calorimetric method

FU Yongjie¹, YU Dongyu²

(1. Institute of Metrology and Testing, Unit 92493 of PLA, Huludao 125000, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the power measurement of high power laser, especially the long-time measurement requirements of high power laser, a laser power measurement method based on water cooling was designed. The laser power was calculated by measuring the temperature differences between the cooling water inlet and the outlet with the thermistor. The three-dimensional finite element model of the heat path structure of the absorption cavity was established by using the finite element simulation software, and the cooling water paths of different calibers were simulated. The test results show that testing the power of high power laser with this method, the measurement relative error can be guaranteed to be within 1.6%.

Key words: optical metrology; high power laser; calorimetric method; long-time measurement

引言

高能激光武器是一种新概念武器, 它是利用激光束直接毁伤目标或使之失效的定向能武器, 具有传播速度快、精度高、能量集中、作用距离远、作战效能高、火力转移迅速、不受外界电磁干扰、持续战斗力强等优点^[1]。因激光武器相对于导弹每次使用的费用很低, 具有其他武器无法比拟的优点, 世界各国争相投入大量人力和资金进行研发^[2]。随着高功率固态激光器技术和光纤激光技术的突破, 以及输出功率的提高, 高能激光武器系统装备发展迅速^[3-4]。高功率能量激光器是强激光武器系统的核心, 激光输出功率能量是激光器的

重要指标^[5-6]。目前已经有 100 kW 的商用激光器量产, 随之而来的高功率测试需求愈发迫切。传统的量热式激光功率测量装置, 随着测量时间的增长, 热量大量堆积, 所需的体积重量急剧增大, 无法满足生产测试需求^[7-9]。为了解决高功率激光的测量问题, 利用循环水作为热的测量载体, 通过测量水的瞬时温升计算激光功率值, 这种方法可以有效避免传统能量累积型高能激光功率计的体积重量问题^[10-12], 所以以循环水作为热测量载体研制高功率激光器功率计是目前解决高功率激光器生产的最有效方法。本文利用水循环冷却激光吸收腔, 验证了以水作为量热载体的可行性。

收稿日期: 2023-09-23; 修回日期: 2023-11-07

基金项目: 国家重点研发计划 (“大功率激光精密加工装备计量技术研究” 2022YFF0606002)

作者简介: 付永杰 (1975—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事计量测试理论与技术、光学参数计量测试技术研究。

E-mail: fuyj75@163.com

1 测量原理

本文采用量热法进行测量,量热法在大功率激光测量中有先天的优势,其原理是将大功率激光转化成热,并用相应的热电探测器进行测量^[13]。高能激光进入吸收腔后,照射到腔内高反射率球形反射体表面上,通过半球形反射体散射后,照射到吸收腔内表面的激光功率密度大大减小,小于吸收腔内表面的激光损伤阈值,进入吸收腔内的激光在球表面多次反射后,逐渐被球体吸收,只有很小一部分从吸收腔入射口处反射出去,称为后向散射光^[14],后向散射激光能量可通过环形能量测量环监测。吸收腔内吸收体将所吸收的光能转换成热能,使吸收体升温,通过高精度采集卡测量固定在各吸收体外表面上电阻丝的电阻变化量^[15-16]。按照预先测量获得的温度电阻曲线,可得到吸收体对温度的变化曲线及升温 ΔT 。根据热辐射、热传导、热对流理论建立热损失补偿数学模型对测量得到的温度进行修正,得到各吸收体对应的升温 ΔT_i ,由各吸收体质量 m 及不同温度条件下材料比热 c ,计算吸收腔体吸收的能量。

本文设计流水加量热式高能激光功率计进行高功率激光功率测试。激光功率计利用筒形吸收腔作为激光能量的吸收腔体,利用循环水作为冷却及测量载体,通过测量水的温升,利用式(1)计算激光功率,通过功率积分可以计算能量。

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

式中: P 为激光功率; m 为单位时间内吸收腔内流过的水的质量; c 为水的比热容; ΔT 为水的温升; $\alpha(\lambda)$ 为吸收腔的吸收系数。

吸收腔为圆柱结构,底面安装 45° 反射锥,圆柱壁用铜管环绕而成,冷却水经过铜管及反射锥,2个温度传感器布置于铜管前及反射锥后,用于测量冷却水前后的温度。

2 吸收腔热学仿真

2.1 仿真条件设置

吸收腔的主要激光吸收部件为利用铜管加工成的螺旋柱形结构,螺旋管的轴向(530 mm)和径向(720 mm)螺旋流体加热模型需考虑固体传热、流体传热、固-液非等温流体流动及传热,以及固体螺旋管表面热发射和对流换热,加热螺旋管流体模型示意图如图1所示。



图1 加热螺旋管流体模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fluid model of heated spiral tube

在仿真计算中^[17],将激光加热看作是均匀分布在螺旋管内表面的均匀热通量(热流密度),选用固体-流体非等温多物理场耦合模型,采用自然对流换热方式,考虑固体表面热辐射和固-液界面动力粘性,同时引入液体(水)各种物性的温度依赖性系数,以便提高仿真模型与真实工况的等效性,并为后续模型优化提供多维可调性。螺旋管材质选铜,初始管内径设为13 mm(目前机械设计数值),管壁厚为2 mm。已知激光能量为20 kW,激光能量均匀作用在螺旋管内侧表面,内侧表面积采用保守数值——内侧表面在圆周上的投影面积约为1.2 m²。螺旋管水流入口温度和螺旋管四周空气温度为293.15 K(20 ℃)。垂直入口的压力为2 atm,垂直出口的压力为1 atm。螺旋管表面采用机械抛光钢材,发射率约为0.25。自然对流系数采用中值,设为10 W/(m²·K)。

2.2 不同水流速的计算结果

以目前机械设计采用的内径为13 mm的管进行建模,并计算水流速分别为2 L/min、4 L/min、6 L/min、8 L/min、10 L/min、12 L/min情况下螺旋管在激光作用1000 s内温度变化情况,如图2~图7所示。

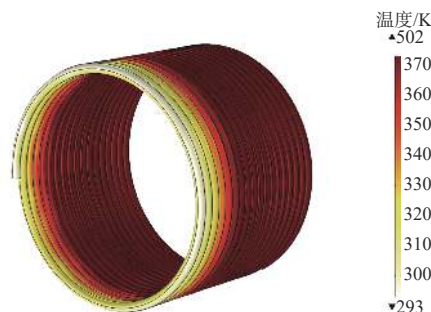


图2 $Q=2$ L/min时加热1000 s后螺旋管温度分布

Fig. 2 Temperature distribution of spiral tube after heating for 1000 s when Q is 2 L/min

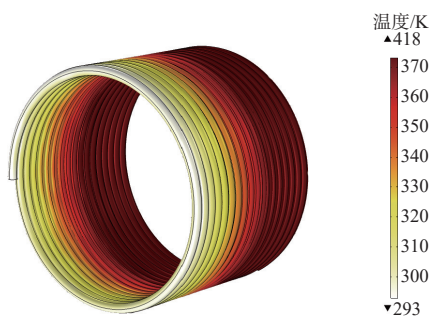


图 3 $Q=4$ L/min 时加热 1000 s 后螺旋管温度分布
Fig. 3 Temperature distribution of spiral tube after heating for 1 000 s when Q is 4 L/min

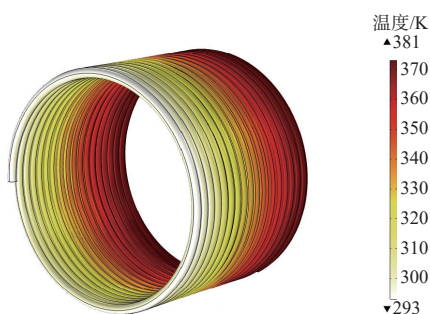


图 4 $Q=6$ L/min 时加热 1000 s 后螺旋管温度分布
Fig. 4 Temperature distribution of spiral tube after heating for 1 000 s when Q is 6 L/min

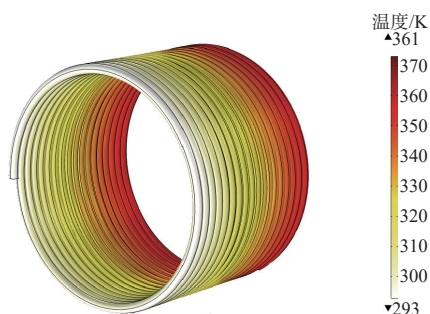


图 5 $Q=8$ L/min 时加热 1000 s 后螺旋管温度分布
Fig. 5 Temperature distribution of spiral tube after heating for 1 000 s when Q is 8 L/min

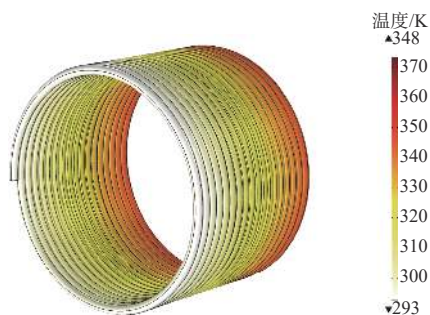


图 6 $Q=10$ L/min 时加热 1000 s 后螺旋管温度分布
Fig. 6 Temperature distribution of spiral tube after heating for 1 000 s when Q is 10 L/min

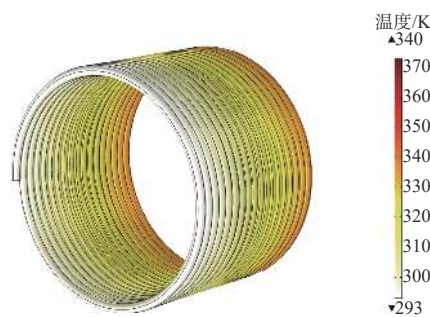


图 7 $Q=12$ L/min 时加热 1000 s 后螺旋管温度分布
Fig. 7 Temperature distribution of spiral tube after heating for 1 000 s when Q is 12 L/min

由图 2~图 7 可知,螺旋管流水及管壁温度随水流速的增大而减小;当水流速 ≤ 6 L/min 时,流水最高温度出现高于 373.15 K (100 $^{\circ}$ C) 的情况;当水流速 ≥ 8 L/min 时,流水最高温度均低于 373.15 K (100 $^{\circ}$ C)。

2.3 仿真结果分析

螺旋管流水及管壁温度随水流速的增大而减小,所以不考虑其他影响因素,增加水流速可以提高功率测量上限。

3 吸收腔后向散射测试

激光功率计的后向散射决定了激光功率计的光电不等效系数,必须予以准确测量。由于腔体口径太大,直接测量对积分球尺寸要求太高,所以制作 1:10 的模型对后向散射进行测量。积分球测量激光功率计的后向散射,其原理如图 8 所示。

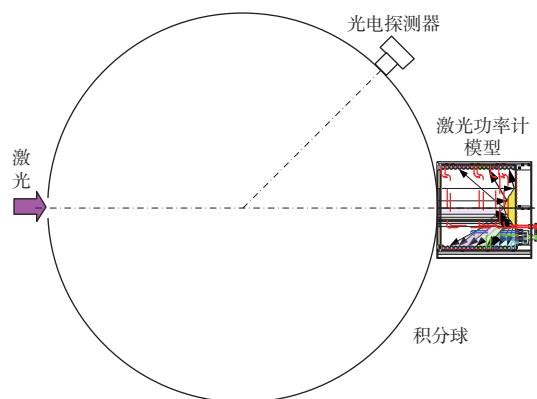


图 8 激光功率计吸收腔后向散射测量原理图及照片
Fig. 8 Schematic diagram and image of backscattering measurement in absorption cavity of laser power meter

激光通过口径 150 mm 积分球的入射口及出口,测量无反射时光信号 I_d ,用已标定好反射

率的聚四氟乙烯反射板挡住出射口测量激光漫射光信号 I_r , 将聚四氟乙烯反射板移出, 用被测量吸收腔替代测量后向反射光信号 I_c , 用式 (2) 可计算得到吸收腔的吸收系数。

$$A = 1 - \frac{I_c - I_d}{I_r - I_d} \quad (2)$$

激光功率计对波长选择性很小, 可用 1 个波长的激光校准后用于其他波长的测量和校准。本文利用 1080 nm 激光进行测量, 吸收腔的后向散射系数为 4.2%。

4 实验结果与分析

4.1 激光功率能量计验证实验

激光功率计用图 9 所示的激光功率计标定系统进行性能验证。

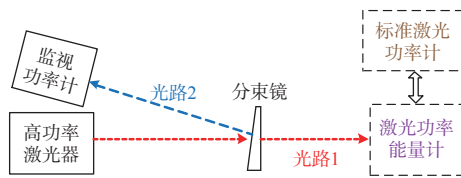


图 9 激光能量计标定系统组成图

Fig. 9 Composition diagram of calibration system for laser energy meter

首先, 将标准激光功率计放入光路 1, 高功率激光器发射激光光束照射到分束镜上, 经分束镜分光后, 标准功率计测量得到透过分束镜 (光路 1) 的功率 P_s , 监视功率计测量得到从分束镜前端面反射 (光路 2) 的光功率 P_{sR} , 由式 (3) 可计算分束镜的分束比。

$$R = \frac{P_s}{P_{sR}} \quad (3)$$

式中: R 为分束镜的分束比; P_s 为标准功率计测量的功率标准值; P_{sR} 为监视功率计的测量值。

将标准激光功率计移出光路 1, 将激光功率计移入光路 1。高功率激光器发射激光光束, 主光路 1 的光照射到激光功率计上, 光路 2 的光照射到监视激光功率计上。监视激光功率计及验证的激光功率计同时测量激光功率 P_{mR} 及 P_m 。由于分束镜的分光比变化很小, 可以忽略不计, 所以可通过光路 2 由式 (4) 计算出光路 1 的标准激光功率值 P_{m0} , 用于验证本文设计功率计的测量相对误差^[18]。

$$P_{m0} = P_{mR} \cdot R \quad (4)$$

式中: P_{m0} 为标准激光功率值; P_{mR} 为监视功率计的测量值; R 为分束镜的分束比。激光功率计相对

误差为

$$\Delta = \frac{P_m - P_{m0}}{P_{m0}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: Δ 为相对误差; P_m 为激光功率计的测量值; P_{m0} 为标准激光功率值。

实际测量时高功率激光器是光纤激光器, 光斑直径为 1.5 cm, 出光功率为 2000 W, 平均功率密度为 1132 W/cm², 其出光功率稳定, 几乎不变。典型测量曲线如图 10~图 13 所示。图 10、图 11、图 13 为采集卡直接采集的数据, 采集频率为 3 Hz。图 12 为图 11 与图 10 的差值, 将其转换为温度差后可以按照式 (1) 计算激光功率。图 13 为监测激光功率曲线, 可以看出激光在 300 s 左右出光, 1500 s 左右结束。激光功率在出光期间基本不变。

图 10 为冷却水入水口的温度变化, 由于冷却水为固定水量内循环, 在激光出光后温度逐步上升, 温度传感器得到温度由 20 °C 左右上升到 30 °C 左右。

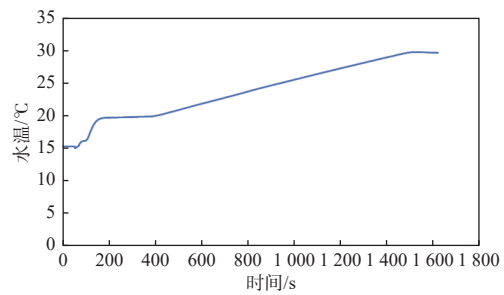


图 10 入水口的温度变化

Fig. 10 Temperature variation of water inlet

图 11 为冷却水出水口的温度变化, 在 300 s 前与入水口温度变化相似, 在 300 s 后激光出光后曲线陡然上升, 激光出光后温度急剧上升。激光停止后温度曲线与入水口温度变化趋势相同, 温度传感器得到温度由 20 °C 左右上升到 32 °C 左右。

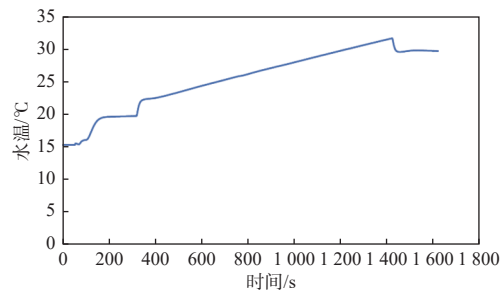


图 11 出水口的温度变化

Fig. 11 Temperature variation of water outlet

图 12 为进出水的温度传感器差值, 反应的是温度变化差值。在 200 s 以前温度平衡前差值存在

剧烈抖动情况,在 200 s 后温度差值稳定在 0℃ 附近,在 350 s 时激光出光,差值稳定在 2.5℃ 左右。由图 12 可见,本文设计的功率测量装置,达到最大值的 80% 需要的时间约为 16 s,可见热平衡需要时间远比光电监测探测器响应时间(0.3 s)长,所以与图 13 相比,图 12 曲线变化缓慢,曲线更加平滑,但是曲线的整体变化与之相似。

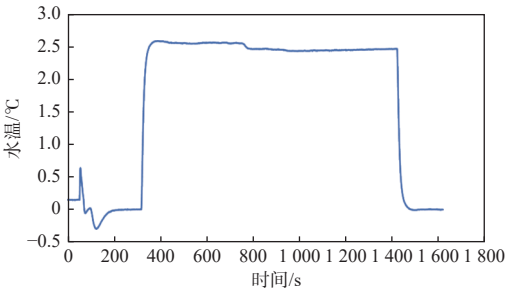


图 12 出水口与进水口的温差

Fig. 12 Temperature differences between water outlet and water inlet

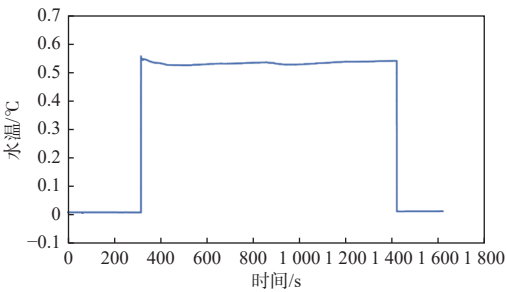


图 13 监测功率曲线

Fig. 13 Monitoring power curve

考虑到实际使用时,水流速不能保证不变,所以在不同流速下对同一激光功率进行测量,测量结果的一致性可以说明该方法的可行性。0.01 L/s、0.05 L/s、0.1 L/s、0.3 L/s 流速下的测量结果如表 1 所示。

表 1 不同水流速下 2 kW 激光功率测量结果

Table 1 Measurement results of 2 kW laser power at different water flow rates

水流速/ (mL/s)	测量 次数	水温 升/℃	激光 功率/W	相对 误差/%
9.56	1	48.29	2023.95	1.2
	2	48.31	2024.78	1.2
	3	48.45	2030.65	1.5
	4	48.48	2031.91	1.6
	5	48.44	2030.23	1.5
	6	48.37	2027.30	1.4

表 1 (续)

水流速/ (mL/s)	测量 次数	水温 升/℃	激光 功率/W	相对 误差/%
50.21	1	9.21	2027.37	1.4
	2	9.17	2018.57	0.9
	3	9.23	2031.78	1.6
	4	9.11	2005.36	0.3
	5	9.18	2020.77	1.0
	6	9.21	2027.37	1.4
101.12	1	4.57	2025.99	1.3
	2	4.54	2012.69	0.6
	3	4.61	2043.72	2.2
	4	4.51	1999.39	-0.03
	5	4.62	2048.15	2.4
	6	4.59	2034.86	1.7
209.91	1	2.17	1996.99	-0.2
	2	2.25	2070.62	3.5
	3	2.15	1978.59	-1.1
	4	2.21	2033.80	1.7
	5	2.19	2015.40	0.8
	6	2.22	2043.01	2.2

不同流速下功率测量结果的相对误差平均值及最大、最小值如图 14 所示,对相同功率的测量结果相对误差平均值相同,但随着流速增加,温差变小,测量相对误差变化范围变大。

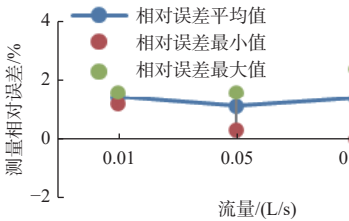


图 14 不同水流速下测量的相对误差

Fig. 14 Relative error of measurement at different water flow rates

4.2 实验结果及测量不确定度分析

以循环水作为测热载体可对高功率激光器的功率进行测量,实验结果表明相同功率下,水流速增加,温差变小。受温度测量系统的测量精度等影响,测量误差会变大,所以用该方法测量激光功率时,水流速的使用应充分考虑系统温度测量性能。按照目前测温系统的性能,在 0.01 L/s 的流速下,测量相对误差可保证在 1.6% 以内。整个测量结果说明该方法可以适应不同流速的功率测量,不会因为流速改变导致测量失效,在进行小功率

高精度测量时需要人为地调低流速,以保证测量误差在允许范围内。

由式(1)可知,高功率激光功率测试的不确定度来源主要有:水流量测量不确定度、水温升测量不确定度、吸收腔吸收系数的测量不确定度、测量重复性引入的不确定度。其中水流量测量不确定度、水温升测量不确定度、吸收腔吸收系数的测量不确定度可以溯源至上级计量机构,属于B不确定度来源。上级计量机构计量结果是:水流量测量不确定度为2.0%($k=2$),水温升测量不确定度为1.6%($k=2$)。由表1数据可知,在9.56 mL/s的流量下测量重复性引入的不确定度为0.16%,50.21 mL/s流量下测量重复性引入的不确定度为0.47%,101.12 mL/s流量下不确定度为0.94%,209.91 mL/s流量下不确定度为1.66%,总不确定度有3.1%。

5 结论

设计了一种流水量热式高能激光功率计,利用循环水作为冷却及测量载体,通过测量进水口和出水口的温差计算激光功率,对不同口径的冷却水路进行模拟仿真,结果显示,增加水流速可以提高功率测量上限。对吸收腔后向散射进行了测试,吸收腔的后向散射系数为4.2%。用激光能量计标定系统对设计的激光功率计进行了性能验证,用其对2 kW激光功率进行测试,实验结果显示,激光功率测量相对误差在1.6%以内。

参考文献:

- [1] 杨剑波,宗思光,陈利斐,等. 高功率激光武器进展与启示[J]. *激光与红外*, 2021, 51(6): 695-704.
YANG Jianbo, ZONG Siguang, CHEN Lifei, et al. Developments and trends of laser weapons[J]. *Laser & Infrared*, 2021, 51(6): 695-704.
- [2] HUANG T R, HUANG W F, WANG J F, et al. Thermal-induced wavefront aberration in sapphire-cooled Nd: glass slab[J]. *Applied Physics B*, 2016, 122: 182.
- [3] LI L X, JIN Y X, KONG F Y, et al. Beam modulation due to thermal deformation of grating in a spectral beam combining system[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(19): 5511-5519.
- [4] 魏继锋,胡晓阳,张凯,等. 高能激光能量直接测量技术及其发展趋势[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(7): 33-41.
- WEI Jifeng, HU Xiaoyang, ZHANG Kai, et al. Technologies and development trends of directly measuring high energy laser energy[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 33-41.
- [5] QIAO C, FAN C, ZHANG J, et al. Research on temperature characteristics of laser energy meter absorber irradiated by ms magnitude long pulse laser[C]//SPIE Conference Series on Laser Components, Systems, and Applications. [s. n.]: SPIE, 2017:10457.
- [6] 刘国荣,吴洪才. 高能激光能量计校准方法研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(6): 982-985.
LIU Guorong, WU Hongcai. Research of calibration method for high energy laser energy meter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(6): 982-985.
- [7] 黎高平,杨鸿儒,杨斌,等. 绝对吸收式激光能量计高准确度校准技术研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(3): 438-441.
LI Gaoping, YANG Hongru, YANG Bin, et al. High-accuracy optical calibration technology for absolute-absorbing laser energy meter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 438-441.
- [8] 秦艳,韩占锁,林利红,等. 飞焦级激光能量计校准系统及方法研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(4): 711-716.
QIN Yan, HAN Zhansuo, LIN Lihong, et al. Study on calibration system and method of femtojoule laser energy meter[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 711-716.
- [9] 吴磊,阴万宏,俞兵,等. 飞秒激光脉冲宽度和脉冲波形测试技术[J]. *应用光学*, 2019, 40(2): 291-299.
WU Lei, YIN Wanhong, YU Bing, et al. Research on femto-second laser pulse width and pulse waveform measurement technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2019, 40(2): 291-299.
- [10] 魏继锋,张卫,何均章,等. 水流吸收型高能激光能量计溯源方法及其溯源体系研究[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26(12): 8-14.
WEI Jifeng, ZHANG Wei, HE Junzhang, et al. Calibration methods and calibration systems of water-absorption-type high energy laser energy meters[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(12): 8-14.
- [11] 赵琦,孟庆安,蒋泽伟,等. 大口径高能脉冲激光参量测量装置的精度研究[J]. *激光技术*, 2015, 39(1): 100-103.
ZHAO Qi, MENG Qing'an, JIANG Zewei, et al. Study on parameter measurement precision of high energy laser beam with large aperture[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(1): 100-103.

- [12] 黎高平, 陈超, 李栋, 等. 高能高功率激光参数测量技术研究[J]. *应用光学*, 2020, 41(4): 645-650.
LI Gaoping, CHEN Chao, LI Dong, et al. Study on parameters measurement technology of high energy and high power laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 645-650.
- [13] 谢永杰, 段刘华, 戢运峰, 等. 高能激光量热式能量探头的研制[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(sup): 80-84.
XIE Yongjie, DUAN Liuhua, JI Yunfeng, et al. Development of calorimetric detector for high energy laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(sup): 80-84.
- [14] 于洵, 王慧, 聂亮, 等. 高能激光计后向散射能量损失补偿方法研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(5): 1052-1057.
YU Xun, WANG Hui, NIE Liang, et al. Energy loss compensation of backscattering of the high-energy laser energy meter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(5): 1052-1057.
- [15] 王振宝, 冯国斌, 陈绍武, 等. 全吸收旋转式高能激光能量计吸收腔设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(12): 1217010-1-1217010-6.
WANG Zhenbao, FENG Guobin, CHEN Shaowu, et al. Design and analysis of absorbing cavity in full absorbing HEL rotational calorimeter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1217010-1-1217010-6.
- [16] 胡鹏, 张建柱. 激光系统中元件热效应时空特性分析[J]. *光学学报*, 2020, 40(20): 112-119.
HU Peng, ZHANG Jianzhu. Analysis of spatio-temporal characters of thermal effects of optical components in laser system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 112-119.
- [17] 胡鹏, 张建柱, 张飞舟. 高能激光系统内光路热效应建模与仿真[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34(1): 115-125.
HU Peng, ZHANG Jianzhu, ZHANG Feizhou. Modeling and analysis of inner thermal effects in high energy laser system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34(1): 115-125.
- [18] 王艳茹, 徐德, 冉铮惠. 一种基于无畸变取样的高能激光能量计校准装置[J]. *中国测试*, 2015, 41(12): 79-82.
WANG Yanru, XU De, RUI Zhenghui. A calibration equipment of high-energy laser energy meter based on distortionless sampling method[J]. *China Measurement & Test*, 2015, 41(12): 79-82.