

石墨锥型高能激光全吸收能量计设计

魏继锋^{1,2,3,4} 蒋志雄^{2,3} 卢飞^{2,3} 周山^{2,3} 常艳^{2,3} 胡晓阳^{2,3} 孙利群¹ 张凯^{2,3} 张卫^{2,3}

¹清华大学精密计量与仪器科学国家重点实验室, 北京 100084

²中国工程物理研究院激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900

³中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900

⁴中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 在高能激光能量计吸收体上很长时间内均存在较大的温度梯度, 这导致吸收体真实温度的测量非常困难, 材料的比热、传感器的响应度和吸收体的热损失对测量准确度的影响较显著, 模拟了吸收体上温度场特性, 提出了一种利用多个分立的热电偶传感器测量吸收体的温升的方法, 通过对热电偶的间距以及在吸收体中的深度加以控制, 可以准确地反映吸收体上每一小部分的平均温度, 从而达到对比热和传感器响应度修正的目的; 采取措施大幅降低热损失比例, 并结合实际温度场分布和系统热平衡时间对热损失可以获得热损失占比; 利用光线追迹方法可以大幅简化吸收体吸收率研究, 以实际光束和吸收腔参数为模拟对象计算了吸收腔的吸收率, 并对测量结果进行修正。在分析了系统各个环节的测量不确定度的基础上估算出设计的激光能量计的测量不确定度约为 5.8% ($k=2$), 采用现场比对方法验证该测量不确定度的合理性。

关键词 测量; 激光能量计; 石墨锥; 吸收体; 热损失; 测量不确定度; 光线追迹

中图分类号 O348

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0208006

Design of Graphite-Cone-Absorption-Cavity Absolute Energy Meter for High Energy Laser

Wei Jifeng^{1,2,3,4} Jiang Zhixiong^{2,3} Lu Fei^{2,3} Zhou Shan^{2,3} Chang Yan^{2,3}

Hu Xiaoyang^{2,3} Sun Liqun¹ Zhang Kai^{2,3} Zhang Wei^{2,3}

¹State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China

²Key Laboratory of Laser Science and Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

³Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

⁴Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract There is great temperature gradient in the absorber of the high energy laser energy meter for a long time, which results in great difficulties in measuring the real temperature of the absorber. In this situation, the accuracy of the energy meter is affected by the heat specific of the material, the responsibility of the temperature sensors and the heat loss. The temperature field of the absorber is simulated, and then a method that multiple discrete thermocouple sensors are used to measure the temperature rise of absorbers is introduced. The average temperature of each small segment in the absorber can be exactly obtained by controlling the distance of the adjacent thermocouples and the depth of the thermocouples, so as to calibrate

收稿日期: 2014-10-10; 收到修改稿日期: 2014-11-26

基金项目: 国家高技术发展计划

作者简介: 魏继锋(1980—), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要从事激光诊断技术方面的研究。E-mail: wjfc02000@163.com

导师简介: 孙利群(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光谱测试及激光干涉测试技术方面的研究。

E-mail: Sunlq@mail.tsinghua.edu.cn

the heat specific and the responsibility of the temperature sensors. The measurements are taken to decrease the rate of the heat loss and the heat loss can also be calibrated after obtaining the real temperature distribution and the time of the thermal equilibrium. The research on the absorption coefficient is facilitated with the ray tracing method. The absorption coefficients with the parameters of the real beams and the real absorption cavity are calculated and the measurement results are calibrated. According to the uncertainty of the each process, the estimate of the measurement uncertainty of the laser energy meter is 5.8% ($k=2$), and the rationality of the measurement uncertainty is verified with the comparison method.

Key words measurement; laser energy meter; graphite cone; absorber; heat loss; uncertainty in measurements; ray tracing

OCIS code 120.3930; 120.4570; 120.4640; 120.4800; 120.3940

1 引 言

近年来高能激光的研究工作得到了快速的发展^[1-4],对高能激光功率和能量等参数的测量精度的要求也越来越高。如果采用衰减或者取样等间接方法进行测量,衰减和取样比要达到 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5}$,测量精度很容易受到取样比的影响^[5-6],为了达到准确测量激光能量的目的,高能激光能量测量中大多采用全吸收型能量计,这类能量测量装置通常为量热型,可以吸收绝大部分入射能量^[7-11],因此具有更加准确、简洁和直观的优点。石墨锥型高能激光能量计将石墨材料加工成锥腔结构,既可以利用锥面降低入射到材料表面的功率密度,又可以利用石墨材料高损伤阈值的特点,因此特别适合高能激光能量直接测量。但是由于整个吸收体的质量和体积通常较大,光斑的尺度与吸收体相比往往小得多,整个吸收体内在很长一段时间内均存在较大的温度梯度,而石墨材料比热和温度传感器的响应度都会随温度显著变化,采用常规的温度测量和能量计算方法将造成较大的测量不确定度;由于入射光经过吸收体表面反射后一部分光会从锥腔出口逸出,这部分光能损失会随着光斑的尺寸和入射位置的变化而变化,因此在设计中需要考虑上述因素造成的测量不确定度;热损失也是需要着重考虑的因素,在文献[12]中所提出的热损失补偿方法,其前提是吸收体的温度能够迅速达到平衡,这一点在常规的小功率能量计上是很容易保证的,但对于高能激光能量计由于吸收体在激光辐照后数百秒后仍然存在较大的温度梯度,采用该方法必然会带来较大的测量不确定度。为了解决上述几个关键问题,提出了一种利用多个分立的热电偶传感器测量吸收体温度的方法,通过对热电偶传感器合理的布局,获得吸收体的温度分布,从而对材料的比热、温度传感器的响应度及热损失进行修正。本文针对上述三个核心问题开展了大量的数值模拟和实验研究,在此基础上开展了石墨锥型高能激光全吸收能量计的工程设计,并利用建立的测量系统开展了比对实验,验证了系统的测量精度。

2 基本结构及原理

能量计的吸收腔结构如图1所示,整个吸收腔采用石墨加工而成,腔体近似为一个圆锥体,为了能够尽量降低入射到吸收体表面的功率密度,锥体的顶角通常设计得较小,光束从锥体底部入射到吸收体内表面上,可以通过测量吸收体的温升和质量得到吸收体的能量增量,从而间接计算出入射激光的能量,其物理模型可描述为

$$\eta E = \iint C(m, T) dm dT + \iint P(s) dt ds, \quad (1)$$

式中 $C(m, T)$ 为石墨材料的比热,在不同区域不同温度下其数值会存在一定的差异, η 为吸收腔的吸收系数,它与吸收腔的结构、光斑的尺寸和光斑入射位置等因素相关,对于全吸收能量计要求 η 大于 99%, $P(s)$ 为吸收体与外界换热面 s 上的热损失功率,在不同的区域上其数值也存在较大的差异, E 为入射激光总能量。

本设计中吸收腔的锥顶角度、口径、质量和壁厚等参数将根据入射光的口径、入射光的功率密度、入射的总能量、石墨材料的抗损伤阈值和加工难度等确定,在文献[13]中有许多这方面的报道和分析,在本文中不再给出详细的设计过程,考虑入射光的特性,吸收腔锥顶角设计为 20° ,吸收腔口径设计为 D ,壁厚设计为 d ,母线长度为 L 。

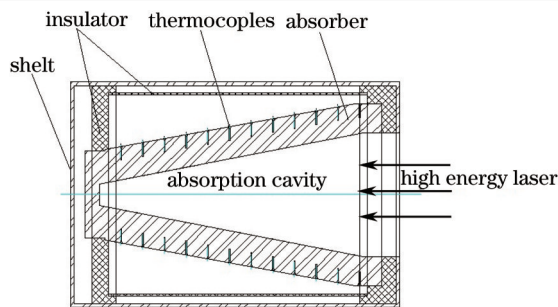


图1 锥腔型全吸收能量计吸收腔结构图

Fig.1 Structure schematic of a graphite-cone-absorption-cavity absolute high energy meter

根据(1)式的物理模型可以看出该方法涉及三项关键技术：

- 1) 准确地获得吸收体上任意区域的初始和热平衡时的温度及对应的比热值；
- 2) 准确地获得吸收体的吸收系数；
- 3) 获得热辐射、对流和传导的热损失功率及对应的传热面积。

下面将针对上述三项关键技术展开分析和设计。

3 关键技术分析与系统设计

3.1 温度测量方法分析

3.1.1 温度场模拟

设激光均匀的辐照在吸收体内表面上，光斑的外径 R 占吸收腔口径 D 的50%，光束为环形束，光斑外径 R 与内径 r 的比值为2.5，激光脉冲宽度为10 s，总能量为1(相对值)，为了简化研究模型，模拟中暂时不考虑吸收体的热损失，图2给出了吸收体温度随时间变化图(由于对称关系，图中只给出了其中半个锥面的剖面分布)。

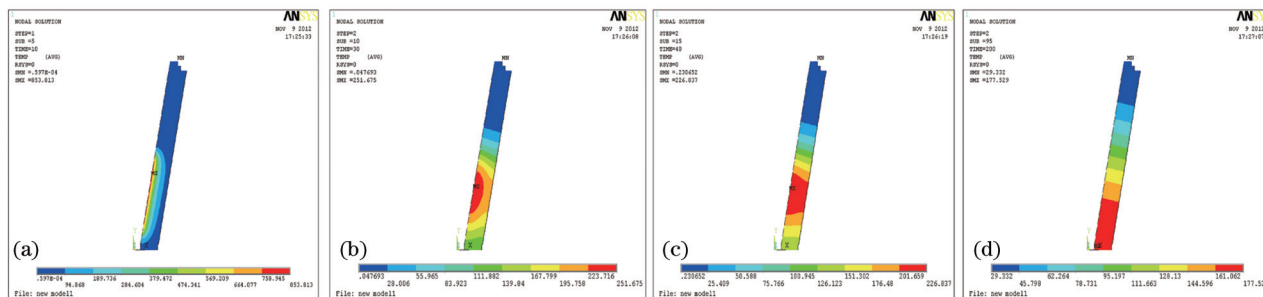


图2 吸收体在激光辐照后的温度分布随时间变化图。(a) 10 s; (b) 20 s; (c) 40 s; (d) 200 s

Fig.2 Chart of the temperature variation of the absorber after the irradiation. (a) 10 s; (b) 20 s; (c) 40 s; (d) 200 s

图3中给出了吸收体外表面沿锥体母线方向温度分布以及垂直母线方向平均温度随时间变化曲线(设母线方 X 轴方向，与母线垂直的壁面方向为 Y 轴方向， X 轴刻度以母线长度 L 归一化， Y 轴刻度以壁厚 d 归一化)。

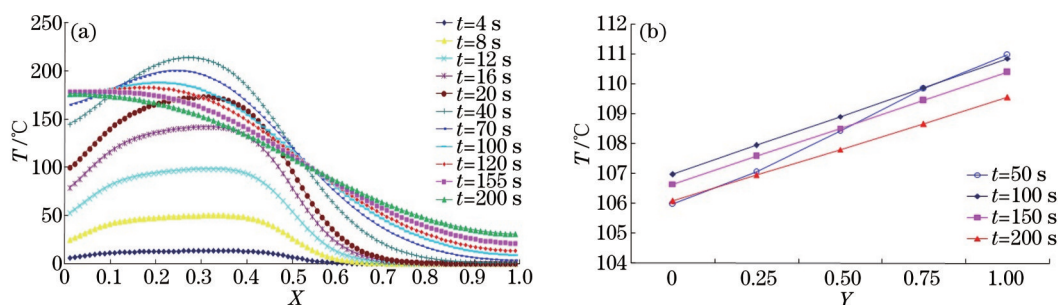


图3 吸收体温度随时间变化曲线。(a) 吸收体外表面沿锥体母线方向温度分布变化曲线，起点为锥底；
(b) 吸收体壁面沿垂直于母线方向平均温度随时间变化曲线，起点为吸收体外壁

Fig.3 Temperature variation of the absorber. (a) Temperature variation of the outer surface along the direction of the conical generatrix, the origin point is the top of the conical; (b) temperature variation of the wall along the direction perpendicular to the conical generatrix, the origin is the outer surface

由图2和图3(a)均可以看出即使在激光辐照后200 s时吸收体的母线方向仍然存在着较大的温度梯度,这给吸收体的温度准确测量带来了很大的困难,尤其是采用传统的铂电阻丝测量吸收体外表面温度的方法更存在致命的缺陷。但是从图3(a)也可以看出随着时间的推移,其温度分布逐渐变平缓了,在一个足够小的区域内温度分布基本线性,区域中心的温度近似等于该区域的平均温升,因此将温度传感器安装在区域中心就能获得该区域的平均温度。同时由于在该区域内温度梯度已经比较小,利用平均温度计算材料比热的方法造成的测量不确定度已经可以忽略了。

由图3(b)可以看出在相当长一段时间内吸收体内外壁也存在着一一定的温度差,如果利用温度传感器测量吸收体外壁温度,必然会造成测量结果偏小,因此温度传感器的测点需要安装在合适的深度。

根据上面的分析只需要将吸收体划分成若干个小区域,在每个小区域中心安装一个热电偶传感器,并使温度传感器的测点位于合适的深度上就可以保证测量系统的测量准确度不受影响。下面将围绕这两点展开分析和设计。

3.1.2 温度测量方法

根据上面的分析,对(1)式中等式右边第一项进行离散化,每个热电偶传感器对应一个区域,该区域的质量为 m_k ,则吸收体的能量增量 E_a 的表达式可描述为

$$E_a = \sum_{k=1}^n m_k \int_{T_1(m_k)}^{T_2(m_k)} C(m_k, T) dT, \quad (2)$$

式中 n 为热电偶的数量, $T_1(m_k)$ 和 $T_2(m_k)$ 分别为吸收体上第 k 块初始温度和吸收体热平衡时温度。

由于不同批次的石墨材料的比热存在一定差异,因此可以选取一块样品送检测机构测量该样品的实际比热曲线,图4中给出了实测某块石墨样品的比热曲线。

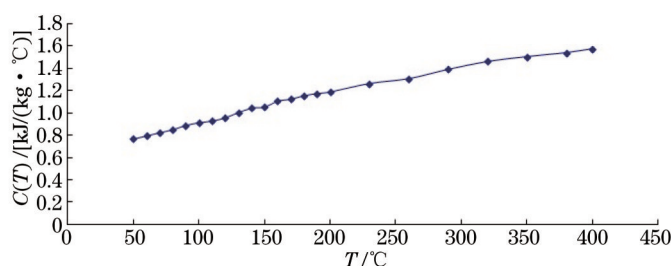


图4 实测的某块石墨样品的比热曲线

Fig.4 Measured heat specific curve of a piece of graphite

根据图4中的测量结果可以拟合出石墨材料比热公式:

$$C(T) = a + bT + cT^2 + eT^3, \quad (3)$$

式中 a, b, c, e 分别为拟合系数。将(3)式代入(2)式可得

$$E_a = \sum_{k=1}^n m_k \left[\frac{1}{4} e T_2^4(m_k) + \frac{1}{3} c T_2^3(m_k) + \frac{1}{2} b T_2^2(m_k) + a T_2(m_k) - \frac{1}{4} e T_1^4(m_k) - \frac{1}{3} c T_1^3(m_k) - \frac{1}{2} b T_1^2(m_k) - a T_1(m_k) \right]. \quad (4)$$

在获得了每个区域的质量、初始温度和热平衡温度后就可以利用(4)式计算出吸收体的能量增量。

3.1.3 传感器布局

下面就是确定热电偶传感器如何布局才能系统的测量准确度,首先确定热电偶之间的间距,仍然按照3.1.1中的温度场进行模拟,将吸收体沿锥体母线方向依次划分成等间距的46份,9份,5份,3份,再根据每个部分的温升计算吸收体上的能量增量,可计算出吸收体上能量增量和误差随时间变化曲线如图5所示。

由图5可以看出9等份时测量结果与46等份时测量结果基本一致,不会造成较大误差,因此综合考虑将吸收体划分成9等份,再考虑光束不均匀以及起伏造成的影响,在吸收体环向传感器的间距仍然按照同样的间距考虑,采用均布的方式,这样可以确保获得一个较高的测量精度。

接着考虑热电偶安装在吸收体上不同深度的影响,设热电偶测点设置在距离吸收体内表面距离分别为 $Y=0, 0.25d, 0.5d, 0.75d, d$ 的位置上,可计算出吸收体上能量增量和误差随时间变化曲线如图6所示。

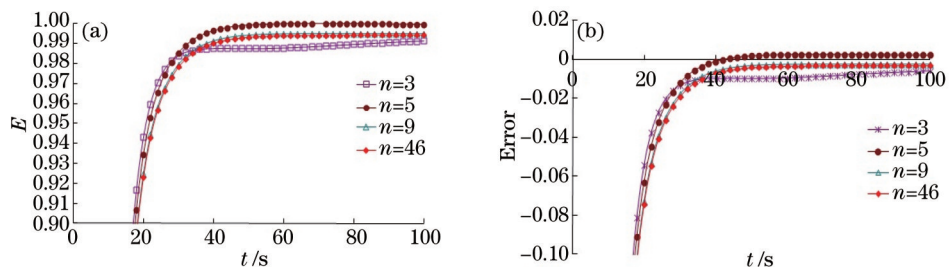


图5 (a) 不同分块方式下能量随时间变化曲线; (b) 不同分块方式下测量误差随时间变化曲线

Fig.5 (a) Curve of the energy increment variation on the absorber under the various block mode; (b) curve of the error variation under the various block mode

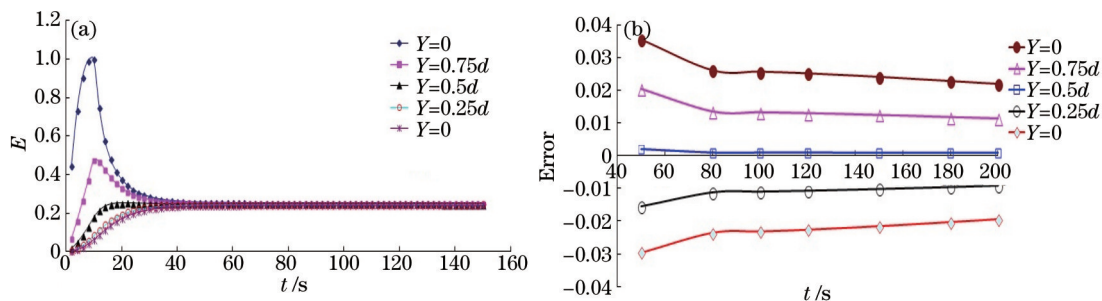


图6 (a) 热电偶设置在不同深度下能量变化曲线; (b) 热电偶设置在不同深度下测量误差变化曲线

Fig.6 (a) Curve of the energy increment variation on the absorber under the different depths; (b) curve of the error variation under the different depths

根据图6中的结果可以看出热电偶传感器的测量位于吸收体壁面中点附近时测量误差最小。根据上述原则设计的能量计的传感器布局如图7所示,图中总计安装热电偶104支,在每个环带上热电偶均匀分布,对应的吸收体可以划分为104份。

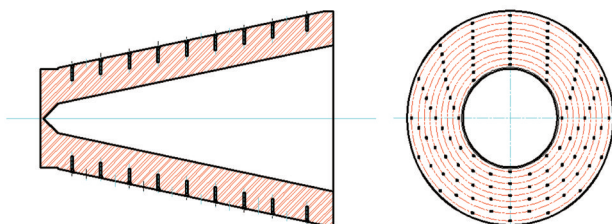


图7 温度传感器布局示意图

Fig.7 Setup of the temperature sensors

3.2 吸收体的吸收系数分析与补偿

激光入射到吸收腔内部以后,大部分激光能量会被吸收体材料吸收,另外一部分光会被材料反射,反射光中绝大部分能量也会被吸收体材料吸收,而其中有一小部分光会从吸收腔出口逸出,从而使测量结果偏小,因此在设计中需要考虑其影响,入射激光在吸收腔内部传输示意图如图8所示。

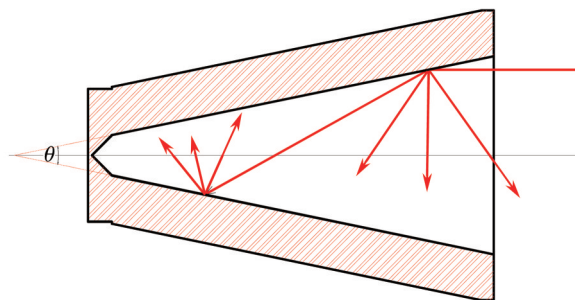


图8 入射激光在吸收腔内的传输示意图

Fig.8 Transmission schematic of the incident laser in the absorption cavity

影响吸收体吸收系数的因素众多,包括吸收体材料表面的反射特性、吸收率、光斑的形状、光束的分布、光束入射位置、吸收腔的设计参数(含尺寸和锥顶角度),在以往的研究中通常按照几何光学方法,对光束的传输和吸收采用数值计算方法,通过多次迭代获得出口的光强分布以及逸出能量占总入射能量的比例^[4],但整个过程相当复杂,计算量较大。本文将采用光线追迹方法,即追踪每根光线在腔内的传输轨迹,并结合吸收腔和实际光束参数进行模拟,计算出从吸收腔出口逸出的激光能量占入射总能量的比例 γ 。

石墨的表面根据处理工艺的不同,反射特性会存在一定的差异,通常以漫反射为主,并伴随有部分镜面反射的成分,其单次吸收率 ζ 通常在 0.7~0.85 范围内,因此在设计中需要对其影响有充分的考虑,为了提高吸收腔对激光的吸收率,并进一步降低材料表面的功率密度在吸收腔内壁上加工有 V 型槽。在模拟中选取实际应用中需要测量的几种激光光斑形态和尺寸,光束仍然为环形束,环形的中心位于吸收腔的中轴线上,设内径为 Φ_r ,外径为 Φ_R ,吸收腔的口径 Φ_D 可以调整,模拟结果如表 1 所示。

表 1 不同参数下吸收腔的吸收率 γ

Table 1 Absorption coefficient γ under different parameters

Parameters	$\Phi_r = r, \Phi_R = 10r/3$	$\Phi_r = r, \Phi_R = 4r$	$\Phi_r = r, \Phi_R = 10r/3$	$\Phi_r = r, \Phi_R = 10r/3$
	$\Phi_D = 5r$	$\Phi_D = 13r/3$	$\Phi_D = 13r/3$	$\Phi_D = 11r/3$
Diffuse reflection, $\zeta = 0.7$	98.43%	98.78%	99.20%	99.40%
Diffuse reflection, $\zeta = 0.75$	98.80%	99.06%	99.39%	99.54%
Diffuse reflection, $\zeta = 0.8$	99.11%	99.30%	99.55%	99.66%
Mirror reflection, $\zeta = 0.75$	99.94%			

由表 1 可以看出当为镜面反射时从出口逸出的光能完全可以忽略,但考虑到石墨材料的反射特性以漫反射为主,因此镜面反射的存在可以有效降低逸出能量的比例,在漫反射条件下单次吸收率越高,整体吸收率 γ 也越高,光斑的外径越小吸收率 γ 也越高,吸收腔的口径越小吸收率越高。

根据上述规律在设计和加工中应尽量使材料表面光滑,提高镜面反射的比例,通过工艺控制尽量提高材料的吸收率,光斑辐照区域尽量靠近锥体底部。还可以根据被测光斑的外径选择合适的光阑,将光阑安装在吸收腔出口处,减小系统的口径,光阑的表面可以镀金,此时反射率可以达到 95% 以上,从而提高吸收腔的吸收率,另外可以根据光斑的实际尺寸、吸收腔的口径和吸收腔的吸收率等参数估算逸出能量值并对最终结果进行修正。最终参数的选择可以选择典型值 $\zeta = 0.75, \Phi_r = r, \Phi_R = 10r/3, \Phi_D = 11r/3$,此时的吸收率应该高于 99.54%。为了验证上述分析,采用一个外径为 $\Phi 60$,平均功率为 3000 W 的激光器入射到吸收腔底部,利用探测器逐点扫描出口处的散射功率,积分后可以计算出散射光占入射光能量的比值约为 0.3%,与理论结果符合得较好。

3.3 热损失分析与补偿

吸收体的热损失包括三部分,传导、对流和热辐射,任意时刻吸收体上的热物理模型为

$$\sum_{k=1}^n m_k c_k \frac{dT_k}{dt} = - \sum_{k=1}^n A_k h_k (T'_k - T_h) - \sum_{k=1}^n A_k \sigma (T_k'^4 - T_h^4) - \sum_{k=1}^n A'_k \alpha \frac{T_k - T_j}{l_k} + \tau P_0, \quad (5)$$

式中 c_k 为第 k 块比热, m_k 为第 k 块质量, T_k 为第 k 块的平均温度,即 3.1 节中热电偶测量的温度, A_k 为第 k 块的表面积, h_k 为第 k 块的对流换热系数, l_k 为距离热电偶测温点的距离, T'_k 为第 k 块的表面温度, A'_k 为与绝热体接触的表面积, T_j 为与第 k 块接触的绝热体的温度, P_0 为入射激光平均功率, τ 为功率系数,当存在激光辐照时 $\tau = 1$, 否则 $\tau = 0$ 。

为了获得吸收体外表面的温度,在吸收体外表面母线方向安装数组薄片式铂电阻,下面首先考虑热传导的影响,绝热体采用聚四氟乙烯加工而成,根据 3.1.1 节的参数及温度场分布可以计算出热传导功率曲线如图 9 所示,同理计算出辐射功率曲线如图 10 所示。

由图 9 和图 10 可以看出聚四氟乙烯的热导率很低,并且是点接触,因此热传导功率远小于辐射功率,可以忽略其影响。同理由于吸收体位于一个封闭空间内,对流换热系数很低,其损失也远小于热辐射功率,因此只需要考虑热辐射的影响。为了降低热辐射的影响,在吸收体外表面附近加装铜制薄板将吸收体包裹成

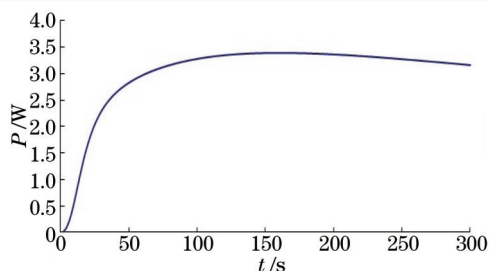


图9 热传导功率曲线

Fig.9 Power variety of the conduct with the time

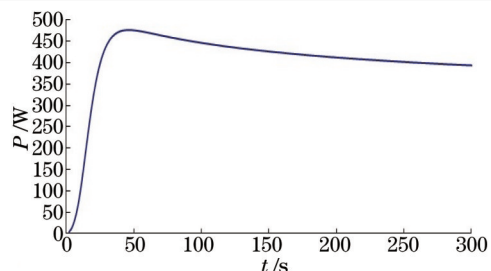


图10 热辐射功率曲线

Fig.10 Power variety of the radiation with the time

起来,铜板的表面镀金或者抛光,在抛光条件下其反射率可达到80%,从而大幅降低热辐射的影响,图11中给出了出光后不同时刻热损失占入射总能量的比例。

根据图10中的曲线就可以对最终测量结果进行修正,进一步降低热损失对测量结果的影响。

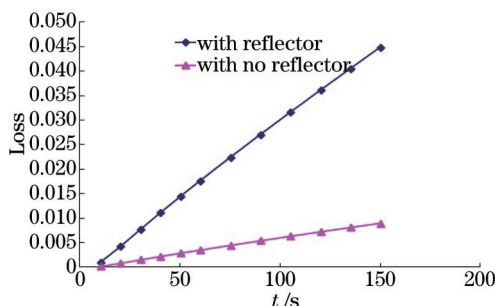


图11 热损失占比随时间变化曲线

Fig.11 Rate variety of the heat loss with the time

4 测量不确定度分析

根据(1)式中的物理模型,分析各个变量引入的测量不确定度如下:

1) 热电偶传感器的测量不确定度 U_T

热电偶送计量检测机构检测获得修正系数及测量不确定度,在上述测量中只有温差值对测量结果构成影响,温升不同相对测量不确定度会有较大差异,吸收体的温升通常控制在10 K~200 K,对应的相对测量不确定度 U_T 为0.3%~1.2%;

2) 数据采集系统测量不确定度 U_c

根据采集系统厂家给出的测量不确定度 U_c 为0.3%;

3) 使用环境造成的测量不确定度 U_b

通过环境实验获得其相对测量不确定 U_b 约为0.2%;

4) 系统噪声造成的测量不确定度 U_z

多次采集本底噪声计算出系统噪声造成的最大测量不确定度 U_z 约为0.4%;

5) 热损失造成的测量不确定度 U_s

通常热平衡时间在60 s内,根据图10在不考虑热损失修正的情况下,造成的测量不确定度 U_s 约为0.2%;

6) 吸收体质量测量不确定度 U_m

吸收体的质量测量以及材料不均匀等造成的质量不确定度 U_m 估计约为0.3%;

7) 比热测量不确定度 U_h

由检测机构给出,此处比热的测量不确定度 U_h 约为1.7%;

8) 比热曲线拟合造成的测量不确定 U_n

比热曲线拟合造成的测量不确定 U_n 约为1%;

9) 激光从吸收腔出口逸出造成的测量不确定 U_l

不考虑修正的情况下,激光从吸收腔出口逸出造成的测量不确定 U_y 为0.3%~1.6%。
各个分项的测量不确定度如表2所示(某些分量在某一个范围内,这里考虑最大情况)。

表2 测量不确定度评价

Table 2 Estimate of the measurement uncertainty

Name	Relative measurement uncertainty
U_T	1.2%
U_c	0.3%
U_h	0.2%
U_z	0.4%
U_s	0.2%
U_m	0.3%
U_b	1.7%
U_a	1.0%
U_y	1.6%
Uncertainty of the laser energy meter ($k=2$)	5.8%

由表2可以预估出激光能量计的测量不确定度约为5.8% ($k=2$)。

5 实验结果

高能激光能量计目前溯源体系很不完善,为了达到溯源的目的主要采用两种方式:第一种为基于电加热或者灯加热的内部校准方法等效校准方法,第二种为比对溯源方法,该方法利用光学元件分光并与其他高能激光能量计比对^[15]。比对光路见图12,包括分光镜、采用本文方法研制的高能激光全吸收能量计 HELEM5000 以及高能激光能量计 CM1500,该能量计采用水流作为吸收介质^[16-18],测量不确定度为3.6% ($k=2$),分光镜的反射率 R 为0.059。

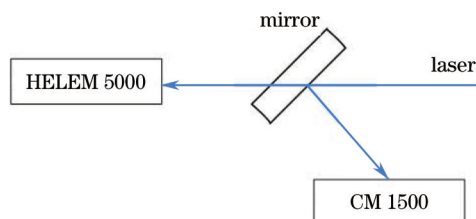


图12 比对光路图

Fig.12 Schematic setup of the comparison experiment

为了判断比对效果引入一个变量 E_n ,定义如下:

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}, \quad (6)$$

式中 x 为 HELEM5000 高能激光全吸收能量计测量能量值, X 为 CM1500 高能激光全吸收能量计测量结果, U_{lab} 为 HELEM5000 高能激光全吸收能量计测量结果的不确定度, U_{ref} 为 CM1500 高能激光全吸收能量计测量结果不确定度。当(6)式中 $|E_n| \leq 1$,表示 HELEM5000 高能激光全吸收能量计的测量不确定度合理;否则当 $|E_n| > 1$,表示 HELEM5000 高能激光全吸收能量计的测量不确定度不合理。

比对实验结果如表3所示。

表3 比对实验结果

Table 3 Results of the comparison experiment

Number	X (relative value)	x (relative value)	E_n
1	1	0.977	0.31
2	1	1.012	-0.16
3	1	0.992	0.11
4	1	1.003	-0.04
5	1	0.997	0.04

由表3可以看出 $|E_n|$ 均小于1,表明HELEM5000高能激光全吸收能量计的测量不确定度为5.8%($k=2$)合理。

6 结 论

石墨锥型高能激光全吸收能量计设计中有三项关键技术:吸收体温度测量技术、热损失控制与补偿技术和吸收腔吸收系数获取及补偿技术。由于高能激光能量高,在吸收体上的分布也严重不均,因此吸收体在激光辐照后很长一段时间内均存在较大的温度梯度,这导致吸收体真实温度的测量非常困难,材料的比热和传感器的响应度对测量准确度的影响显著,通过模拟吸收体上的温度分布及变化表明:在高能激光全吸收能量计设计中利用多个分立的热电偶传感器测量吸收体的温升,并通过热电偶的间距以及在吸收体中的深度加以控制,可以准确地反映吸收体上每一小部分的平均温度,从而达到对比热和传感器响应度修正的目的;对于吸收体的热损失则以控制为主、修正为辅,采取一些绝热措施减少热损失能量占总能量的比例可以取得较好的效果,辐射和对流完全可以忽略,在获得吸收体的温度分布以及热平衡时间后就可以对热损失进行修正,通过上述措施热损失对测量不确定度的影响可以控制在可以忽略的范围内;吸收腔吸收系数采用光线追迹方法可以大大简化研究过程,研究表明吸收体材料表面的反射特性、吸收率、光斑的形状、光束的分布、光束入射位置、吸收腔的设计参数均会对吸收腔的吸收系数造成影响,结合光束的尺寸参数和材料的反射特性可以获得吸收腔的吸收率,并对测量结果进行修正。在分析了系统各个环节的测量不确定度的基础上估算出激光能量计的测量不确定度约为5.8%($k=2$),采用现场比对方法验证该测量不确定度的合理性。

参 考 文 献

- 1 Chen Jinbao, Guo Shaofeng. Review on technical approach of high energy solid-state lasers[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602006.
陈金宝,郭少锋.高能固态激光器技术路线分析[J].中国激光,2013,40(6):0602006.
- 2 Wei Jifeng, Chang Yan, Huang Dequan, *et al.*. Research on the near-field propagation characteristics of the stray light for the unstable resonator chemical oxygen iodine laser[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0214004.
魏继锋,常艳,黄德权,等.非稳腔氧碘激光器近场杂散光传输特性研究[J].光学学报,2014,34(2):0214004.
- 3 Zhang Lei, Luo Kaiyu, Lu Jinzhong, *et al.*. Effects of laser shock processing on cavitation erosion resistance of laser weldments[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0203001.
张磊,罗开玉,鲁金忠,等.激光冲击强化对激光焊接件气蚀行为的影响[J].中国激光,2013,40(2):0203001.
- 4 Wei Jifeng, An Jianzhu, Su Yi, *et al.*. Research on the near-field angular power spectrum characteristics of high frequent light in high energy chemical oxygen iodine laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0502009.
魏继锋,安建祝,苏毅,等.高能COIL激光近场高频光角谱特性研究[J].中国激光,2014,41(5):0502009.
- 5 Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. 210.
苏毅,万敏.高能激光系统[M].北京:国防工业出版社,2004.210.
- 6 Wei Jifeng, Guan Youguang, Zhou Shan, *et al.*. Research on effect to online energy measurement device for long-pulse laser by laser pulse width[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(4): 1088-1092.
魏继锋,关有光,周山,等.激光脉冲宽度对长脉冲激光能量在线测量装置影响研究[J].中国激光,2010,37(4):1088-1092.
- 7 Smith R L, Russell T W, Case W E, *et al.*. A calorimeter for high power CW lasers[J]. IEEE Trans Instrum Measurement, 1972, 21(4): 434-438.
- 8 Johnson E J Jr. Evaluating the inequivalence and computational simplification for the NBS laser energy standards[J]. Appl Opt, 1977, 16(8): 2315-2321.
- 9 Li Gaoping, Wang Lei, Yang Zhaojin, *et al.*. Study on the measurement of long pulse high power laser energy[J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 34(9): 1111-1114.
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,2004,34(9):1111-1114.
- 10 Thomas R S. Megawatt laser calorimeter designs[C]. 8th IEEE Instrumentation and Measurement Technology, 1991. 227-231.
- 11 Wei Jifeng, Guan Youguang, Zhou Shan, *et al.*. Online calibration methods for high energy laser energy measuring equipment[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 988-992.

- 魏继锋, 关有光, 周 山, 等. 高能激光能量测量装置现场标定方法研究[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 988-992.
- 12 Wang Lei, Yang Zhaojin, Li Gaoping, *et al.*. Research on temperature characteristics of absolute calorimetric energy meter for high energy laser[J]. Journal of Applied Optics, 2005, 26(5): 29-32.
王 雷, 杨照金, 黎高平, 等. 绝对式高能激光能量计温度特性研究[J]. 应用光学, 2005, 26(5): 29-32.
- 13 Yu Jing. Study on the watt-level primary standard for laser power[J]. Modern Measurement and Test, 1998, 23(1): 38-41.
于 靖. 瓦级激光功率基准器研究[J]. 现代计量测试, 1998, 23(1): 38-41.
- 14 Wang Lei, Yang Zhaojin, Li Gaoping, *et al.*. Research of backscatter energy for cone-shaped high energy laser energy meter[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2005, 25(3): 59-64.
王 雷, 杨照金, 黎高平, 等. 锥形腔高能激光能量计后向散射问题研究[J]. 宇航计测技术, 2005, 25(3): 59-64.
- 15 Wei Jifeng, Zhang Kai, Zhou Shan, *et al.*. Research on calibration of high-energy-laser calorimeter[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(11): 1798-1802.
魏继锋, 张 凯, 周 山, 等. 高能激光能量计溯源问题研究[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(11): 1798-1802.
- 16 Wei Jifeng, Sun Liqun, Zhang Kai. Volume absorption laser energy meter for high energy laser by water absorption[J]. Appl Phys B: Laser Opt, 2013, 110(4): 573-578.
- 17 Wei Jifeng, Sun Liqun, Zhang Kai, *et al.*. Phase transition model for water flow in a chamber by high-energy laser[J]. Chin Phys B, 2014, 23(7): 074209.
- 18 Wei Jifeng, Sun Liqun, Zhang Kai. Study on the influence of the response characteristics of the temperature sensor on the measurement accuracy of a water-absorption-based high energy laser energy meter[J]. Meas Sci & Technol, 2013, 24(5): 055103.

栏目编辑: 何卓铭