

## 高能激光能量直接测量技术及其发展趋势

魏继锋<sup>1</sup>, 胡晓阳<sup>1</sup>, 张凯<sup>1</sup>, 孙利群<sup>2</sup>

- (1. 中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;
2. 清华大学 精密计量与仪器科学国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 高能激光功率高、能量大, 造成激光能量计容易损坏和测量不确定度增加。围绕上述问题对国内外现有的几种高能激光能量直接测量方法进行了比较和归纳, 对各种技术的优点和缺点作了深入的分析, 在此基础上阐述了高能激光能量直接测量技术的发展趋势。研究表明, 提高热交换效率是提升高能激光能量计测量能力最高效的措施, 尤其是在采用体吸收模式和强制热交换模式的情况下这种效果更加明显; 消除吸收体上温度梯度对吸收体材料比热和温度传感器响应时间的影响是提高被动吸收型高能激光能量计测量准确度的关键, 在水流冷却型高能激光能量计和水流直接吸收型高能激光能量计中消除水流相变的影响和控制水流温度场不均匀造成的影响则是保证温度准确测量的关键。目前各种高热交换效率和新体制的测量方法得到快速发展和应用, 系统的测量能力和测量准确度大幅提高, 为了适应未来长时间测量需求, 能量累积型高能激光能量计逐渐被功率平衡型高能激光能量计所替代。

**关键词:** 高能激光; 能量计; 发展趋势; 热交换效率; 温度梯度; 测量不确定度  
**中图分类号:** O348   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0706004

## Technologies and development trends of directly measuring high energy laser energy

Wei Jifeng<sup>1</sup>, Hu Xiaoyang<sup>1</sup>, Zhang Kai<sup>1</sup>, Sun Liqun<sup>2</sup>

- (1. Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;
2. State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The power and energy are very high, as a result, laser energy meters are easily damaged and measurement uncertainties are increased. The domestic and overseas methods to directly measure high energy laser (HEL) energy were compared and summed up, and the benefit and the drawback of the technologies were thoroughly analyzed, finally, the development trends of the technologies to directly measure HEL energy were expatiated. The research shows that it's the most effective measures to improve the measurement capacities to increase heat exchange efficiency, and especially when the body-absorbing model and the compelling heat exchange model were adopted, these effects are better; it's the key to improve the measurement accuracy of passive-absorbing-type HEL energy meter to eliminate the

收稿日期: 2016-11-07; 修订日期: 2016-12-09

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2014AA01A02027)

作者简介: 魏继锋(1980-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事高能激光参数诊断技术方面的研究。Email: wjcom2000@163.com

通讯作者: 孙利群(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学精密计量方面的研究。Email: sunlq@pim.tsinghua.edu.cn

effects of temperature gradient in the absorber on specific heat of material and response time of temperature sensors; while it's the key to improve the measurement accuracy of water-absorbing-type HEL energy meter to eliminate the effects of phase change of water, and uneven of water temperature. Nowadays all kinds of higher heat exchange efficiency and new mechanism methods are quickly developing and applied, as a result, the measurement capacities and measurement accuracy are improved, and the energy-accumulating-type energy meters are replaced by power- equilibrium-type energy meter to adapt to longer duration of lasers in the future.

**Key words:** high energy laser; energy meter; development trend; heat exchange efficiency; temperature gradient; measurement uncertainty

## 0 引言

高能激光能量参数是高能激光器一项最基本也是最重要的参数,因此国内外科研工作者对高能激光能量测量方法和校准技术开展了大量的研究<sup>[1-12]</sup>,常用的高能激光能量测试方法主要包括两种:直接测量法(又称为全吸收测量法)和间接测量法。间接测量法采用取样器件,例如分光镜取样,其衰减倍率通常达到1000~10000倍<sup>[11]</sup>。由于激光的功率和能量很高,这些器件长期在激光的辐照下取样比存在较大的不确定性,当取样比发生变化时就会造成较大的误差。对于一个取样比为1/1000的取样器件,当取样比变化0.001时将会造成100%的误差<sup>[12]</sup>。当采用直接测量方式时可有效消除取样比变化对测量结果造成的影响。然而当高能激光的功率和能量非常高时,它几乎可以对其传输路径上的任何材料造成严重的破坏,因此直接测量其功率能量将是一件非常困难的工作<sup>[13]</sup>,因此如何提高能量计的抗激光损伤阈值是需要解决的首要问题;另外由于激光的能量较高导致吸收体的温升通常很高,并长期存在较大的温度梯度,因此能量计的热损失、温度准确测量的难度以及材料比热容的影响会显著增大,如何保证测量的准确度也是需要解决的重要问题。文中将围绕提高高能激光能量计测量能力和提升测量准确度两方面开展深入的探讨和分析。

## 1 能量直接测量技术现状

高能激光能量直接测量方法主要包括三种:第一种是烧蚀称量法,其原理是利用高能量激光的热

效应烧蚀有机玻璃,根据有机玻璃的烧蚀比和实验前后的减少量来计算激光的能量值<sup>[14]</sup>。这种方法的优点是成本低、操作简单方便,但是测量误差大,定标困难,该方法在早期的研究中曾使用过,目前已经被后两种方法完全取代了。第二种方法是被动吸收型方法,即利用固体材料,通常是铜、铝或者石墨作为吸收体,并通过特殊的结构和工艺研制而成<sup>[15-16]</sup>,这类系统结构相对简单,规模也较小,主要用来测量较低功率和能量的高能激光,由于涉及的环节和影响因素相对较少,往往可以获得较高的测量准确度;第三种为主动冷却型方法,即利用水或者其他介质作为冷却介质,并通过测量液体吸收激光前后的温升变化计算出激光能量<sup>[17]</sup>,由于水流的主动冷却作用使得这类系统可测量的功率和能量上限显著提高,但系统的规模庞大,对液体的流量要求较高,由于受限于流场分布特性的影响,当激光功率密度很高、持续时间较长时,系统也会发生损坏。

### 1.1 被动吸收型高能激光能量计

被动吸收型高能激光能量计中最典型的三种结构分别是积分球结构、锥腔型结构和反射锥结构,下面将针对上述三种结构的特点展开介绍和分析。

#### (1) 积分球结构

图1给出了北京光电技术研究所研制的积分球型高能激光能量计的典型结构<sup>[18]</sup>。

如图1所示,激光束首先辐照在积分球内部的一个扩散反射器上,扩散反射器为一个凸面镜,可降低球体内表面的激光功率密度。在积分球壳内表面镀有漫射层,确保光束能够较好地匀化,为了达到足够的衰减量,要求积分球有足够大的内表面积。经过匀化的光进入光电二极管探测器就可以得到功率强

度变化,对功率进行积分就可获得激光能量。有些积分球结构激光能量计采用量热法,在球体的外表面上均匀地缠绕有铜线电阻,通过测量电阻阻值的变化计算出吸收体的温升,再结合吸收体的质量和比热计算出激光能量。

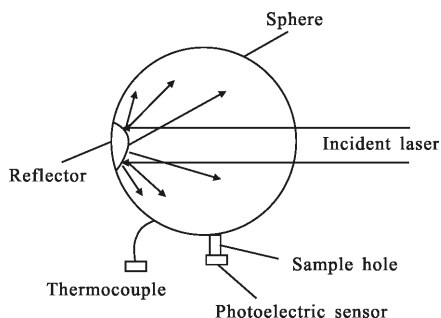


图 1 积分球高能激光能量计

Fig.1 High-energy laser energy meter with integrated sphere

(2) 锥腔型结构

锥腔型高能激光能量计的原理示意图如图 2 所示<sup>[19]</sup>。

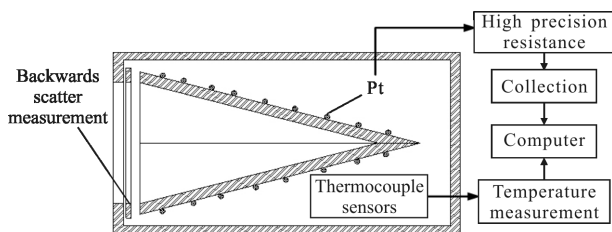


图 2 锥腔型高能激光能量计

Fig.2 Cone-absorption-cavity high-energy laser energy meter

图 2 中将铝材或者石墨等材料加工成一个锥体结构,锥体内表面进行黑色处理,增加腔体的吸收率,外表面进行绝缘处理,并缠绕有铂电阻丝。激光入射到锥体内部被吸收体材料吸收,通过测量铂电阻丝的阻值变化来测量吸收体的温升,根据吸收体的质量和比热容计算出激光能量<sup>[20]</sup>。其能量计算公式如公式(1)所示:

$$E=MC_p\Delta T/f(\lambda) \quad (1)$$

式中: $E$  为激光能量,  $\text{kJ}$ ;  $M$  为吸收体质量,  $\text{kg}$ ;  $\Delta T$  为吸收体温升,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $C_p$  为吸收体材料的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg}^{\circ}\text{C})$ ;  $f(\lambda)$  为吸收体吸收系数,即吸收体吸收的激光能量占入射能量的比例。

但是在上述锥腔型高能激光能量计中,整个吸

收体的质量和体积较大,光斑的尺寸与吸收体相比往往小得多,吸收体在很长一段时间内均存在较大的温度梯度,而石墨材料比热容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,中国工程物理研究院魏继锋研究团队针对上述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,从而对材料的比热容、温度传感器的响应度及热损失进行修正<sup>[21-22]</sup>。吸收体上传感器的布局如图 3 所示。

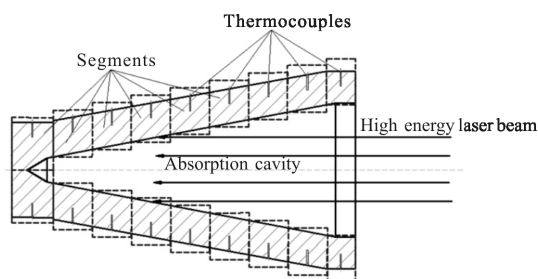


图 3 锥腔型高能激光能量计温度传感器布局及对应的区域分布图

Fig.3 Setup of temperature sensors and their area of cone-absorption-cavity high-energy laser energy meter

该方法中将吸收体划分为若千的区域,每个区域设置一个热电偶测量出该区域内平均温度并对该区域的材料比热容和传感器的响应度进行修正,从而大幅降低了温度测量过程中引入的测量误差;另外对于从出口逸出的激光能量损失则采用光线追迹方法进行了计算和补偿,热损失利用有限元方法进行了计算分析和修正,在采取上述方法补偿和修正的基础上,系统的测量精度得到了大幅提高,利用参考文献[23-24]中提出了大功率卤钨灯作为校准源的高能激光能量计校准方法对上述系统进行了校准,得到的校准系数为 1.009,校准系数的测量不确定度为 2.6% ( $k=2$ )。

(3) 反射锥型结构

反射锥结构能量计与积分球结构能量计类似,通过加工成半球形或者锥体的反射锥将光束扩展到外围的铝制或者铜制圆筒上,圆筒吸收激光能量后温度升高,通过圆筒外表面缠绕的热阻丝测量圆筒

的温升,结合质量和比热计算激光能量,其原理示意图如图 4 所示。

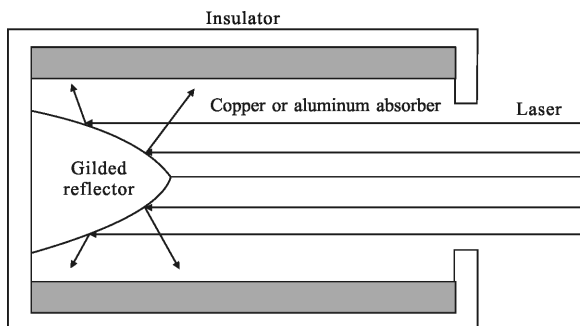


图 4 反射锥结构高能激光能量计

Fig.4 High-energy laser energy meter with a reflecting cone structure

为了对高能激光能量计吸收体上的温度场进行有效控制,降低吸收体表面的最大温升,减小吸收体上的温度梯度,中国工程物理研究院魏继锋研究团队提出了一种阶梯锥结构,利用多个阶梯状反射面将激光能量分配到吸收体的各个部分,通过对吸收体进行划分,并控制吸收体各部分的质量和结构达到控制温度场和平衡时间的目的<sup>[25]</sup>,图 5 给出了该方法与传统反射锥方法的结构比较。

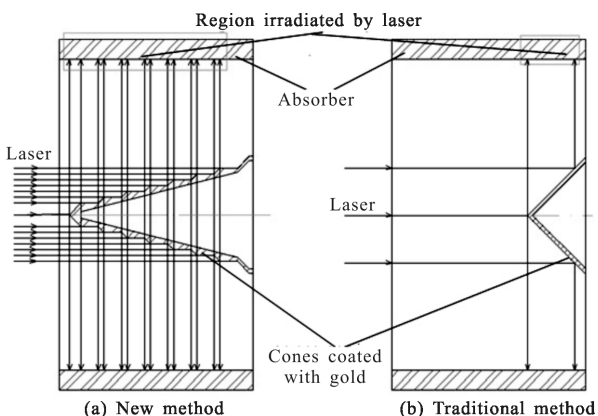


图 5 上述反射锥能量计与传统的反射锥能量计结构比较

Fig.5 Comparison of the structure of the gilded reflection cone above with the traditional one

### 1.2 主动冷却型高能激光能量测量技术

这类高能激光能量计的典型结构有法国 LNE 国家实验室的 CO<sub>2</sub> 工业激光器能量测量系统,该系统对连续光测量范围为 1~50 kW<sup>[26]</sup>。该能量计结构如图 6 所示。

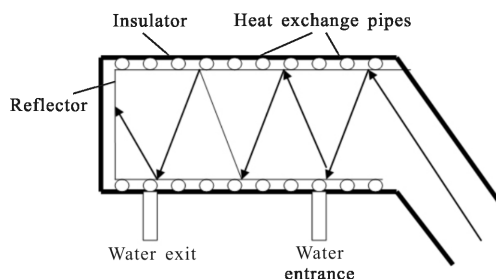


图 6 LNE 热交换能量计结构图

Fig.6 Structure of calorimeter of LNE

该能量计设计为一铜制柱状吸收体,内表面镀反射膜层。在吸收体内部缠绕有水管,激光辐照在水管上并被水管吸收,水管内部的水流对水管进行冷却,通过测量水流的能量增量获得激光的入射能量。该能量计功率测量的不确定度约为±3%。

美国 UTRC 联合技术研究中心研制了一套高功率能量计,该能量计测量功率可达到兆瓦,工作光谱范围为 2~11 μm。高能激光首先照射到一个铜制弹头反射元件上,并被该反射元件散射到热交换器上,热交换器由铜管组成,这些管道也缠绕在吸收体上。管道上镀有一层吸收膜可提高吸收率<sup>[27]</sup>。该系统的结构原理图如图 7 所示。温度传感器测量水流的温升 ΔT,并计算出激光功率 P 如公式(1)所示:

$$P=4.19V_m C_p \Delta T \quad (2)$$

式中:V<sub>m</sub> 为水的流量率,kg/s;C<sub>p</sub> 为水流的比热容, J·(kg·K)<sup>-1</sup>;ΔT 为水流的温升,K。

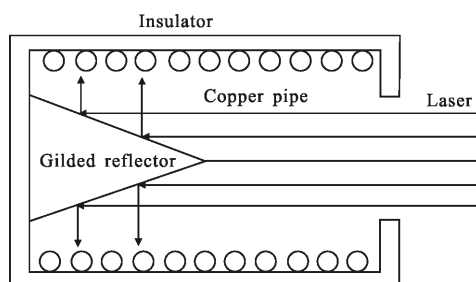


图 7 美国 UTRC 的 DF 能量计

Fig.7 Structure of calorimeter of UTRC for DF

图 8 给出了 NIST 设计的一种流水式激光能量计。该系统可测量 100~200 kW 的激光输出。该能量计入口镀有高反膜,可增加接收口径。激光首先照射在镀金的柱面反射镜上,经过柱面镜扩束后再照射到旁边的平面反射镜或喷砂的镀金铜板上,最后被反射到覆盖有黑色涂层的吸收体表面,最终被吸收

体吸收。水流在腔壁的夹套内循环,可加快热交换速度并带走一定的能量<sup>[28]</sup>。

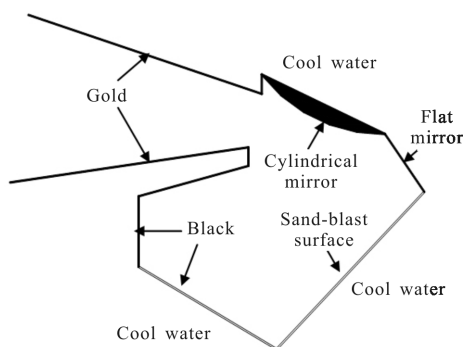


图 8 NIST 流水式能量计结构

Fig.8 Structure of water-cooling calorimeter of NIST

该装置测量的波长范围为 1~11 μm, 测量能量的上限为 10 MJ。该仪器通过测量吸收体外围夹套内水的温升计算高能激光能量。

### 1.3 水流直接吸收型高能激光能量测量技术

中国工程物理研究院应用电子学研究所魏继锋研究团队提出了一种直接利用水流作为吸收介质的高能激光全吸收方法, 采用该方法建立的系统中激光直接通过安装在吸收腔上窗口镜进入水流, 并被水流所吸收, 通过测量水流通过吸收腔前后的温差计算出水流的能量增量, 该方法的原理框图和吸收腔的结构图如图 9 和图 10 所示<sup>[29]</sup>。

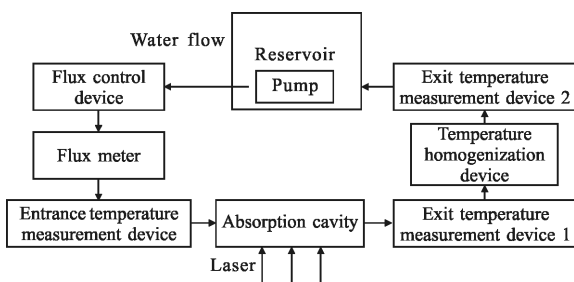


图 9 水流直接吸收型能量计原理图

Fig.9 Principle schematic of the water-absorbing energy meter

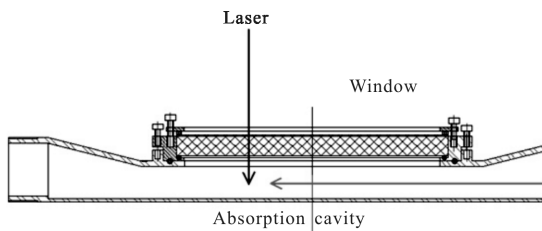


图 10 吸收腔结构图

Fig.10 Structure of the absorption cavity

在参考文献[30-32]中作者还对该测量装置吸收腔内的热交换模型、相变模型以及传感器响应时间对测量精度的影响进行深入的研究, 由于该项技术中采用的是一种体吸收方法, 吸收介质还可以快速的流动, 因此热交换效率显著提高, 系统的热平衡时间也大幅降低, 通常的高能激光能量计热平衡时间通常在激光辐照结束后数十秒才能达到热平衡, 而该方法达到热平衡的时间可以控制在 1 s 以内, 图 11 给出了某次实验中能量增量响应时间和激光功率波形曲线, 对比两个曲线可以看出激光开始辐照和结束辐照后很短时间系统就达到平衡了, 尽管在激光辐照的最初阶段以及激光结束出光的短时间内两者的曲线并不吻合, 但是两根曲线的积分结果完全一致, 保证了能量测量的准确性, 同时大幅提高了系统的测量能力。

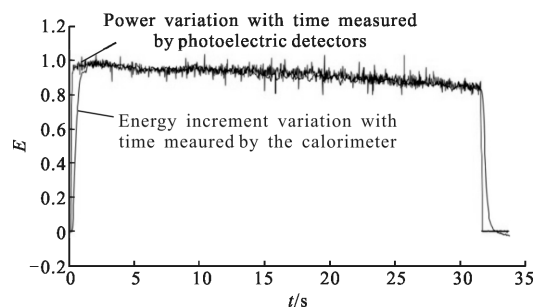


图 11 能量增量曲线与激光功率曲线随时间变化的对比

Fig.11 Comparison of laser energy increment variation and power variation with time

为了保证测量的准确度, 一方面减少相变的发生, 并将系统设计成一个密封结构, 确保相变气体能够完全逆变, 消除相变的影响, 引入强制热交换方法对流场进行控制和整形, 使水流的温度快速达到均匀, 从而消除温度不均匀对测量准确度的影响, 通过这些措施保证了测量系统的准确度, 利用参考文献[33]中提出的电热等效方法对系统开展了校准研究, 修正系数为 1.015, 系统的测量不确定度为 4.8%(k=2)。

## 2 不同的能量直接测试技术比较与分析

在上述几种高能激光能量直接测量方法中采用固体材料直接作为吸收体的方法最简单, 涉及的环节最少, 测量不确定度的控制和分析也最简单, 因此更适合于研制高精度的测量设备或者基准能量计。但是由于受到固体材料自身热导率限制, 热交换效

率可提高的空间相对有限,当激光的功率和能量特别高时,材料表面温度可能会超出材料的损伤阈值,使能量计吸收腔损坏。这也就限制了这类能量计的使用场合,通常只能用在中功率高能激光上,对于更高功率和能量的激光则需采用其他测量方法。

在固体材料直接作为吸收体的几种典型结构中,锥腔结构和反射锥加圆筒结构使用较普遍,主要由于这两种结构易于加工,系统的规模相对较小,使用更方便,通过合理地控制出口逸出能量和热损失,同样可满足较高的精度要求。对于积分球结构既要控制直接从积分球入口逸出的能量,又要达到高精度测试需求,往往要求积分球的直径是积分球入射口径的10倍,对于一个 $\Phi 300\text{ mm}$ 的光斑则要求积分球的直径为3000 mm,系统将非常庞大,加工难度也很大。另外就目前的技术而言,这种漫反射涂层抗激光损伤阈值的问题也没有得到很好的解决,涂层本身无法承受较高的功率密度和能量密度,因此主要用于较低功率的测量场合。但如果将球体内表面处理成黑色涂层(例如喷涂陶瓷材料),尽管承受的功率密度会显著增大,但是吸收体上温度的非均匀性又会显著增加,给测量精度造成较大影响。除此之外由于积分球体积庞大,热损失较多,系统的绝热设计要求也较高,往往很难达到较高的测量精度,因此目前在高能激光能量测试中应用的较少。

如果采用液体或者水流作为冷却介质对吸收体进行冷却,该方法能够很大程度上改善热传导效果,减少热累积。由于液体具有流动性,且温度远低于吸收体的温度,它能够不断地将吸收体上的热量带走,从而达到降低吸收体表面温升的目的。众所周知,在所有的液体物质中水是一种较为理想的材料,首先水具有较高的比热容,能够吸收更多的激光能量;其次水的化学性质稳定,不会受热分解,也不易与其他物质发生化学反应;而且水极为常见,成本低,使用方便。

但采用水作为冷却物质也无法从根本上解决热交换效率不高的问题。当激光功率一定时,要降低吸收体的温度,只有通过降低水流初始温度或者是增加换热系数,而换热系数的大小主要由水流流速和吸收体的形状等确定。可通过增加水流流速来加大换热系数,但其可提高的空间不太大。在输入功率很大时,要达到热平衡通常也比较困难,这从一定程度

上限制了激光作用时间。另外,由流体力学的知识可知,当水流在一定形状的管路中运动足够距离后,速度将不再随距离的增加而变化,此时管路中速度的分布将是一种抛物线形,即中间速度快,两边速度慢,而在靠近壁面处速度几乎为零。上述几点大大限制了热交换效率,热量无法在短时间内全部被水流带走,因此在激光作用时间较长时,吸收体上仍然可能出现热量累积,最终造成吸收体表面破坏。

水流作为冷却介质的方法由于具有更高的热交换效率,较固体直接作为吸收体的方法更适合于测量高功率、高能量激光,但是也需要先将入射到吸收体上的功率密度降至足够低,以保证吸收体上的平衡温度低于材料的损伤阈值。水流作为冷却介质的方法还需要主动冷却系统,规模相对会大一些,精度控制上也会存在更多的困难。

在水流作为吸收介质的方法中,激光可以通过窗口直接进入水流中,由于水流在水泵的推动下会迅速地流出吸收腔,吸收腔内的水流会不断被新的水流所置换,再考虑到水流自身的扰动和对流影响,即使吸收腔中部分水流在高功率激光束的辐照下暂时转变成蒸汽,也不会对系统造成破坏。利用该新机制的测量方法可以大幅提高系统的功率测量上限。但由于不同波长的激光在水流中的吸收深度存在较大的差异,譬如对 $10.6\text{ }\mu\text{m}$ 激光,1 mm的水层即可吸收99%以上的能量,而对于 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 激光,要达到同样的吸收率水层的厚度需达到100 mm以上,这种差异限制了该项技术的应用场合和范围。

### 3 高能激光能量直接测量技术的核心问题和关键技术

综合上述分析,高能激光能量直接测量技术的核心包括两大方面。

#### 3.1 提高高能量激光能量计的测试能力

要提高高能激光测试能力,主要包括三方面的内容:

- (1) 提高系统的热交换效率;
- (2) 降低吸收体表面的功率密度;
- (3) 提高吸收腔的抗损伤阈值。

文中介绍的被动吸收型测量方法和主动冷却型测量方法中大量采用反射锥和发散透镜的作用就是

降低吸收体表面的功率密度;采用石墨和铜等高熔点、高热导率的材料的目的就是为了提高吸收腔的抗激光损伤阈值,同时提高系统的热交换效率;采用主动冷却型测量方法的目的也是为了提高热交换效率,但是不管是被动吸收型测量方法,还是主动冷却型测量方法,热交换效率提升的空间都不大,这是由于物理机制所决定的:首先材料热传导系数是材料的一项基本物理参数,很难有本质的提高,例外不管是被动吸收型方法还是主动冷却型测量方法,激光与吸收体之间的热交换均为面吸收,水流对吸收体的冷却受到流场效应的影响,在靠近壁面的区域流速很慢,因此热交换效率都很难满足高热流密度测量需求。在水流直接吸收型测量方法中,激光直接入射到水流中迅速被水流吸收,因此激光与水流的热交换过程为体吸收,热量通过强制流动快速转移也从本质上提高热交换效率,因此该方法的热交换效率也最高<sup>[34]</sup>,图 12 中给出了三种测量方法机理比较。

料的比热容和传感器的响应度分别进行修正,从而大幅降低温度测量引入的测量不确定度。对于被动吸收型高能激光能量计材料的比热容和温度梯度的影响修正是提高系统测量准确度需要解决的首要问题,对于水流冷却型高能激光能量计和水流直接吸收型高能激光能量计,吸收介质通常为水流,而水的比热容受温度影响很小,但是水在高功率激光或者高热流密度下可能发生相变,另外水流流经温度传感器时截面上温度可能存在不均匀,此时首要的问题则是确保消除相变影响和水流温度不均匀的影响。一方面减少相变的发生,另一方面在一个密闭空间内使相变的水流发生逆变,能量再次释放到水流中,消除相变对测量结果的影响,并对温度场进行控制,使水流到达传感器时温度均匀,保证温度测量的准确度。

(2) 减少激光能量从吸收腔出口逸出所引入的测量不确定度

首先可以通过优化系统结构和提高吸收体材料表面吸收率达到降低从激光能量计吸收腔出口逸出能量的目的,然后还可以采用光线追迹方法计算出从出口逸出能量的比例,再结合实验方法对逸出能量进行测量,并根据理论和实验结果进行补偿和修正,从而降低由于激光逸出所引入的测量不确定度。

(3) 降低激光热损失对测量结果的影响

首先可以采取绝热措施尽量减少热损失,然后可以根据热物理模型拟合出不同时刻热损失能量占总能量的比例,并对测量结果进行补偿,从而达到降低激光热损失对测量结果影响的目的。

(4) 发展高准确和高可信度的校准技术

高能激光能量计作为一台测试设备,其校准是无法回避的问题,而目前高能激光能量计的校准体系尚未建立,只能通过电光等效和电热等效方法对系统开展内部校准或者自校准,因此提升校准的等效性,减少校准测量不确定度也是提高高能激光能量计的一个重要途径。

#### 4 高能激光能量直接测量技术发展趋势

随着激光技术的快速发展,各种不同波长的高功率激光器技术指标不断被突破,为了适应不同激光束能量直接测量需求,各种新型的高能激光能量测量技术也得到了快速发展,其发展趋势主要表现

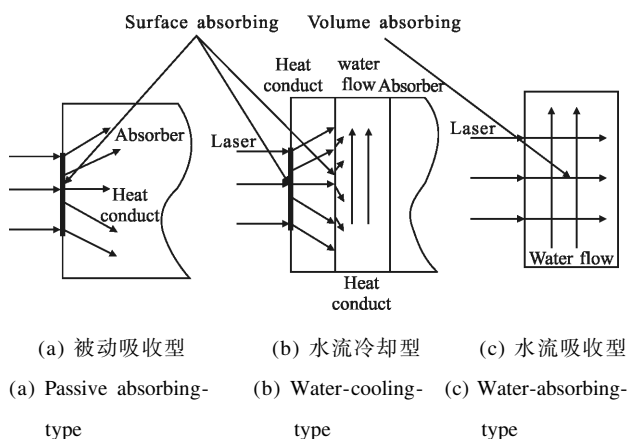


图 12 三种测量方法的比较

Fig.12 Comparison of the three methods

### 3.2 提高高能激光能量计测量准确性

提高测量准确性主要从以下几方面着手:

(1) 保证温度测量的准确性

温度传感器需要准确反映吸收体的温度,当吸收体上长时间存在温度梯度或者温度不均匀时,温度准确测量的难度会显著提高,这一方面要求采取措施尽量降低吸收体上的温度梯度,缩短热平衡时间,使介质的温度能够快速达到均匀,另外一方面还需要对传感器的布局进行优化,使传感器能够准确地测量出一个小区域内的平均温度,此时即使存在一定的温度梯度的情况下仍然可以对每个区域的材

在以下几方面:

(1) 各种高热交换效率和新体制的测量方法得到快速发展和应用

为了适应高功率和大能量测量需求,体吸收方法替代传统的面吸收方法可大幅度提高热交换效率和能量计的测量能力。另外在传统的主动冷却型测量方法中,微通道和射流冲击沸腾等高效传热技术也得到了应用,从而达到扩展测量系统测量能力的目的。

(2) 能量累积型高能激光能量计逐渐被功率平衡型高能激光能量计所替代

由于目前高能激光器的出光时间越来越长,甚至达到准连续,此时尽管激光的功率相对以往大幅降低,但是累积的能量却显著增加,采用传统的能量累积型高能激光能量计将会受到很多制约。对于功率平衡型高能激光能量计,如何提高探测器的响应时间已经成为未来研究的一个重点。

(3) 系统的测量准确度不断得到提升

各种因素对测量准确度的影响作了大量深入的研究,通过对这些因素引入的测量不确定度加以控制和对测量结果进行修正,大幅提升了系统的测量准确度。另外校准技术也得到了快速的发展,这也为系统测量准确度提升奠定了坚实的基础。

(4) 小型化和环境适应能力成为未来研究的一个重要方向

由于高能激光参数指标不可能一直向上拓展,当现有的技术已经能够满足基本测试需求时,如何小型化和如何提升系统的环境适应性就成为当前需解决的首要问题,这也为相关技术的推广奠定了坚实的基础。

## 5 结论

对国内外现有的高能激光能量直接测量技术作了详细的介绍,并对几种主要方法各自的特点进行了比较和分析,对高能激光直接测量技术的核心问题和关键技术进行了梳理和归纳,在该项技术中最核心的问题是提高高能激光能量计的测量能力和提升测量准确度,研究表明:提高热交换效率、降低吸收体表面的功率密度和提高吸收腔的抗激光损伤阈值是提升系统测量能力的主要方法,其中提高热交换效率是最高效的措施,现有技术中水流直接吸收型高能激光能量计采用体吸收和强制热交换方法,

具有最高的热交换效率和测量能力,水流冷却型高能激光能量计相对于被动吸收型高能激光能量计热交换效率有所提升,但受限于材料的热特性和对流传热机理,测量能力提升的空间有限。确保温度测量准确度、降低热损失影响、减少从能量计出口逸出能量的影响和发展高准确度校准技术是提升测量准确度的重要方法,消除吸收体上温度梯度对吸收体材料比热容和温度传感器响应时间的影响是提高被动吸收型高能激光能量计测量准确度的关键,在水流冷却型高能激光能量计和水流直接吸收型高能激光能量计中消除水流相变的影响和控制水流温度场不均匀造成的影响则是保证温度准确测量的关键。热损失和出口能量逸出的影响均可以通过理论和实验方法修正达到大幅减少测量不确定度的目的。目前高能激光能量直接测量技术正向更多元化发展,各种高热交换效率和新体制的测量方法得到快速发展和应用,系统的测量能力和测量准确度大幅提高,为了适应长时间测量需求,能量累积型高能激光能量计逐渐被功率平衡型高能激光能量计所替代,在未来一段时间内系统的小型化和环境适应性成为当前需解决的首要问题,这为相关技术的推广奠定了坚实的基础。

## 参考文献:

- [1] Hocquet S, Penninckx D, Bordenave E, et al. FM to AM conversion in high power lasers [J]. *Appl Opt*, 2008, 47: 3338-3349.
- [2] Livigni D, Cromer C, Scott T, et al. Thermal characterization of a cryogenic radiometer and comparison with a laser calorimeter[J]. *Metrologia*, 1998, 35: 819-827.
- [3] Crespy C, Villate D, Soscia M, et al. RLCYC 75: a 2 kW electrically calibrated laser calorimeter designed for Laser Mega Joule diagnostics calibration [J]. *Metrologia*, 2013, 50: 37-48.
- [4] Soni R K, Mandloie V K, Pote M B. Spinning cone water film power meter for high-power CO<sub>2</sub> laser [J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, 39: 196-201.
- [5] Wei Jifeng, Guan Youguang, Zhou Shan, et al. Online calibration methods for high energy laser energy measuring equipment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36 (9): 988-992. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 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 Journal of Lasers*, 2010, 37(4): 1088–1092. (in Chinese)
- [8] Wang Lei, Yang Zhaojin, Li Gaoping, et al. Research on temperature characteristics of absolute calorimetric energy meter for high energy laser [J]. *J Applied Optics*, 2005, 26(5): 29–32. (in Chinese)
- [9] Zhao Falun, Xu Jun, Xu Yibing, et al. Temperature characteristics of an absorbing cavity in the calorimetric energy meter for high-energy laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 825–829. (in Chinese)
- [10] Xie Rongjie, Dan Liuhua, Zai Yunfeng, et al. Development of calorimetric detector for high energy laser energy measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S1): 80–84. (in Chinese)
- [11] 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. (in Chinese)
- [12] Su Y, Wan M. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004: 210. (in Chinese)
- [13] Thomas R S. Megawatt laser calorimeter design [C]//IEEE, 1991, CH2940–5: 227–231.
- [14] Wang Hui. Research of the energy loss compensation of high-energy laser energy meter[D]. Xi'an: Xi'an Technology University, 2010. (in Chinese)
- [15] Ji Yunfeng, Liu Weiping, Duan Liuhua, et al. Fast thermal balancing full absorbing HEL calorimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 387–391. (in Chinese)
- 戢运峰, 刘卫平, 段刘华, 等. 快平衡全吸收式高能激光能量计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 387–391.
- [16] Yu X, Li Q, Nie L, et al. Research of the conical cavity high-energy laser energy meter energy loss compensation technique[C]//SPIE, 2008, 7155: 71552R.
- [17] Steiner T D, Butts R R, Kramer M A. The airborne laser advanced concepts tested[C]//SPIE, 1998, 3381: 23–29.
- [18] Lu Yaodong, Shi Hongmin, Qi Xue. Integrated sphere application in the field of powerful laser energy measurement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(s0): 106–108. (in Chinese)
- [19] Yu Xun, Wang Hui, Nie Liang, et al. Energy loss compensation of backscattering of high-energy laser energy meter [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(5): 1052–1057. (in Chinese)
- [20] Wang Lei, Yang Zhaojin, Li G P, 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. (in Chinese)
- [21] Wei Jifeng, Jiang Zhixiong, Lu Fei, et al. Design of graphite-cone-absorption-cavity absolute energy meter for high energy laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0208006. (in Chinese)
- [22] Wei Jifeng, Lu Fei, Sun Liqun, et al. Research on temperature measurement technology of graphite-cone-absorption-cavity absolute calorimetric energy meter for high energy laser [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86: 025001(8pp).
- [23] Wei Jifeng, Yan Chang, Sun Liqun, et al. Electro-optical equivalent calibration technology for high-energy laser energy meters[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 045114.
- [24] Wei Jifeng, Hu Xiaoyang, Sun Liqun, et al. Technology for radiation efficiency measurement of high-power halogen tungsten lamp used in calibration of high-energy laser energy meter[J]. *Appl Opt*, 2015, 54(9): 2289–2295.
- [25] Wei Jifeng, Lu Fei, Jiang Zhixiong, et al. Controlling technology of temperature field for absorbers of gilded-reflection-cone high energy laser energy meter [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(12): 121001. (in Chinese)
- [26] Culoma A, Chablat J, Soscia M, et al. High power laser beam diagnostics: an application to the ETCA 25 kW CO<sub>2</sub> laser[C]//SPIE, 1998, 1024: 20–25.
- [27] Andrus Garay. Continuous wave dauterium fluoride laser beam diagnostic system[C]//SPIE, 1988, 888: 17–22.
- [28] Smith R L, Russell T W, Case W F, et al. A calorimeter for high power CW lasers [J]. *IEEE Trans Instrum Measurement*, 1972, IM–21(4): 434–438.
- [29] Wei Jifeng, Sun Liqun, Zhang Kai. Volume absorption laser energy meter for high energy laser by water absorption[J]. *Applied Physics B: Laser and Optics*, 2013, 110: 573–578.
- [30] Wei Jifeng, Sun Liqun, Zhang Kai, et al. Heat exchange model in absorption chamber of water-direct-absorption-typed laser energy meter [J]. *Optic and Laser Technology*, 2015, 67: 65–71.
- [31] Wei Jifeng, Sun Liqun, Zhang Kai, et al. Phase transition model of water flow irradiated by high-energy laser in a chamber[J]. *Chin Phys B*, 2014, 23(7): 074209–1–6.
- [32] Wei Jifeng, Sun Liqun, Zhang Kai, et al. 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: 055103.
- [33] Wei Jifeng, He Junzhang, Zhou Shan, et al. Research on calibration methods and calibration systems of water-absorption-type high energy laser energy meters [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 12(26): 120201. (in Chinese)
- [34] Wei Jifeng. Research on directly measuring technology and calibration system for energy of high energy laser [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)