

## 大能量长脉冲激光能量计吸收体温度特性

李 南<sup>1,2</sup>, 乔春红<sup>1\*</sup>, 范承玉<sup>1</sup>, 杨高潮<sup>1</sup>

(1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**以大能量长脉冲激光能量的准确测量需求为牵引, 针对激光能量计吸收体温度特性进行了数值分析研究。结果表明: 吸收体内壁温度随脉冲结构呈周期性振荡, 随着壁深的增加, 震荡幅度迅速地降低, 吸收体外壁温度周期性消失。单脉冲能量相同时, 脉宽越短, 吸收体内壁温升越高; 重复频率越高, 吸收体内壁温升越高。而总能量相同时, 重复频率越高, 内壁温升越低。通过对吸收体结构的优化设计, 不仅能够获得序列长脉冲激光的总能量, 而且可以获得低重频(一般不大于 10 Hz)序列脉冲激光的每个脉冲能量, 从而为长脉冲激光能量计的设计及应用等提供参考依据。

**关键词:** 激光能量计; 吸收体; 长脉冲激光; 温度特性

**中图分类号:** TN249; TB96 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0406004

## Temperature characteristics of absorber for large-energy long pulse laser energy meter

Li Nan<sup>1,2</sup>, Qiao Chunhong<sup>1\*</sup>, Fan Chengyu<sup>1</sup>, Yang Gaochao<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** For requirement of accurate measurement of large-energy long pulse laser energy, the temperature characteristics of absorber for laser energy meter are numerically analyzed and researched. The results show that, the temperature of absorber inwall rises with periodic oscillation. As the wall deep increasing, the oscillation amplitude decreases rapidly. The temperature of absorber outerwall is without periodism, and it rises gradually with time. Meanwhile, the factors to affect the temperature rise are single pulse energy, pulse width and repetition frequency. When the single pulse energy is same, the shorter the pulse width, the higher the temperature rise of absorber inwall. And also the higher the pulse repetition frequency, the higher the temperature rise of absorber inwall. But when the total energy is same, the higher the repetition frequency, the lower the temperature rise of absorber inwall. By the optimization design of absorber structure, the total energy of long pulse laser sequence can be measured. As well as the energy of every pulse for low repetition frequency pulse sequence can be obtained, when the repetition frequency of long pulse laser sequence is less than 10 Hz. The work provides important references for the design and application of large-energy long pulse laser energy meter.

**Key words:** laser energy meter; absorber; long pulse laser; temperature characteristics

收稿日期: 2017-05-02; 修订日期: 2017-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(61405205)

作者简介: 李南(1980-), 女, 助理研究员, 博士生, 主要从事激光光学参数测量方面的研究。Email: nli@aiofm.ac.cn

导师简介: 范承玉(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光大气传输等方面的研究。Email: cyfan@aiofm.ac.cn

通讯作者: 乔春红(1980-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光大气传输及激光参数测量等方面的研究工作。Email: chqiao@aiofm.ac.cn

## 0 引言

近年来,随着固体激光技术的迅速发展<sup>[1-3]</sup>,激光器的输出功率水平不断提高。对于序列长脉冲激光而言,据报道其单脉冲能量已达千焦耳量级,平均功率已突破百千瓦<sup>[4]</sup>。激光输出能量/功率的准确测定是评价激光器品质和激光器研制水平的一项重要指标。在诸多激光工程的应用中,对激光能量/功率准确测量的需求也越来越迫切<sup>[5-6]</sup>。激光能量计是用来测量激光能量的重要手段。针对大能量激光,为了提高测量精度,通常采用基于量热法的全吸收型激光能量计<sup>[7-12]</sup>。吸收体是激光能量计的重要组成部分,其温度响应特性及规律直接关系到系统的设计及测量精度。因此,研究激光能量计的吸收体温度特性具有重要意义。

目前,对于高能连续激光辐照下能量计吸收体温度特性已进行了大量的研究<sup>[13-18]</sup>。王雷等人<sup>[13]</sup>针对内壁黑色的球形或锥形吸收体在连续激光加热下的温度特性进行了相关研究;刘国荣等人<sup>[14]</sup>就激光能量计吸收体内外表面温差对测量结果的影响进行了分析;罗华平、杨高潮等人<sup>[15]</sup>就金属材料对连续激光的热响应进行了研究;李南、杨高潮等人<sup>[16]</sup>对金属球壳在连续激光辐照下的热效应进行了数值计算分析;赵法林等人<sup>[17]</sup>对石墨多边形吸收腔结构进行了温度特性研究;王振宝<sup>[18]</sup>等人对一种新型的旋转式激光能量计吸收体在连续激光辐照下的温度场分布进行了模拟计算。然而,对于发展较为迅猛的大能量序列长脉冲固体激光的能量测量技术鲜有公开报道。毫秒级序列长脉冲激光与连续激光不同,平均功率相同条件下其峰值功率密度较高,热量将在很短时间内堆积起来,致使在脉冲持续的短时间内热量无法快速地传导出,这不仅容易对金属吸收体内表面造成损伤,而且还会影响到吸收体外表面的温度特性,进而影响到激光能量测量的准确性。为此,文中针对毫秒级大能量序列长脉冲固体激光辐照情况,开展激光能量计吸收体温度特性数值分析研究,以期获取不同脉冲宽度、不同重复频率等条件下的吸收体温度响应特性及规律,从而为脉冲激光体制下的能量计设计及应用等提供参考依据。

## 1 激光能量计吸收体传热学的物理模型

由于金属材料良好的热物理特性,抗激光损伤能力相对较强,在激光能量计设计中经常采用金属吸收体<sup>[12,16]</sup>。当激光辐照金属吸收体内表面时,由于趋肤效应,入射激光能量被金属材料表层吸收<sup>[19]</sup>,转化为热能,并通过热传导向吸收腔体外壁扩散,形成温度场。在忽略热辐射和空气热对流损失的条件下,可以用傅里叶导热定律来描述激光辐照吸收体的传热过程。在此模型中,吸收体选择常用的球形腔或圆柱形腔结构形式;吸收体内壁温度场均匀分布;吸收体外壁绝热。针对脉冲激光辐照的情况,在传统连续激光传热学模型基础上考虑了脉冲宽度及重复频率等因素。球形腔吸收体和圆柱形腔吸收体在脉冲激光辐照下具有相似的温度特性,文中以球形腔为例进行数值计算分析,下面公式(1)给出了脉冲激光辐照下球形吸收腔的温度场分布。

$$\begin{cases} \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \\ T(r,0) = T_0 \quad t=0 \\ \frac{\partial T}{\partial t} = -q_w(t)/\lambda \quad r=a \\ \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad r=b \end{cases} \quad (1)$$

式中: $T$ 、 $r$ 、 $t$ 分别表示吸收腔上各点的温度、径向距离和激光辐照时间; $\alpha$ 为吸收体材料的热扩散率,单位  $\text{m}^2/\text{s}$ ,且  $\alpha = \lambda / (\rho C)$ ;  $\lambda$ 为材料热导率,单位  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\rho$ 为材料密度,单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $C$ 为材料比热容,单位  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $q_w(t)$ 为激光功率密度变化函数; $T_0$ 为初始环境温度; $a$ 、 $b$ 分别为球形腔的内、外半径。

公式(1)中功率密度变化函数由公式(2)表示。

$$q_w(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ q_0, & (n-1) \cdot t_0 \leq t \leq (n-1) \cdot t_0 + t_h \quad (n=1,2,3,\dots) \\ 0, & (n-1) \cdot t_0 + t_h \leq t \leq n \cdot t_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $q_w(t)$ 按矩形波函数规律变化; $q_0$ 为脉冲激光峰值功率密度; $t$ 为序列脉冲作用时间; $t_h$ 为脉冲宽度; $t_0$ 为脉冲作用周期; $n$ 为脉冲序列数。

## 2 计算结果及分析

根据激光能量计系统的设计情况及大能量长脉

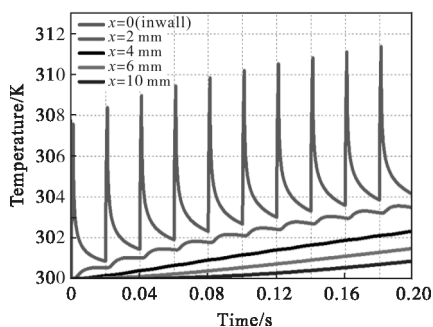
冲激光的特点,利用有限元法对公式(1)进行数值求解,获得吸收体温度场分布。数值计算条件选取如下:吸收体材料选取为紫铜;吸收体内半径 100 mm,壁厚 10 mm,初始温度 300 K。长脉冲激光脉宽 0.5~10 ms,重复频率 10~400 Hz,单脉冲能量 200~2 000 J;激光辐照时间为 1 s。吸收体材料为紫铜是经过对不同金属材料热物理特性对比分析后选取的;吸收体内半径及壁厚是根据大能量长脉冲激光器的输出能量范围和吸收体材料的温度响应特性决定的;大能量长脉冲激光参数是结合国内外几种大能量长脉冲激光器技术参数选取的。

图 1 给出了吸收体温度场随激光辐照时间的变化。图 1 中脉冲宽度为 1 ms,重复频率为 50 Hz,单脉冲能量 1 000 J(吸收体内表面的平均功率密度为 796 W/cm<sup>2</sup>)。从图 1 可以看出,吸收体内壁( $x=0$  处)温度随脉冲结构呈间歇式的周期振荡,振荡周期与振荡幅度分别与脉冲的重复频率及单脉冲能量有关。这是由于金属材料的趋肤效应,使得激光能量沉

积在内表面很薄的一层材料中,导致吸收体内壁温度迅速升高;在脉冲间隔时间内,这很薄一层材料内的能量通过热传导向吸收体外壁扩散,使得内壁温度快速下降。在距离吸收体内壁 2 mm 厚度处,温度仍随脉冲结构呈周期振荡升温,但振荡幅度较小;在距离内壁大于 4 mm 厚度直至吸收体外壁( $x=10$  mm 处),周期性振荡及振幅起伏现象基本消失,温度随时间逐渐增加。

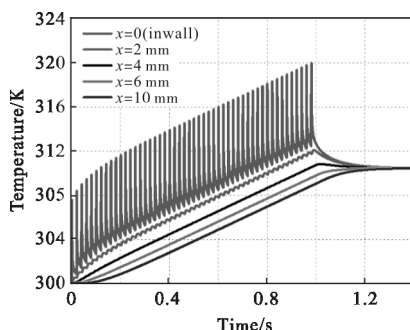
激光能量计是通过对吸收体外壁平均温度增量的测量来实现对入射激光能量的判定。从图 1(b)可以看出,在激光辐照停止时,吸收体外壁温升较内壁有一明显的滞后。由于金属材料的热导率较大,吸收体内外壁温度在很短时间内达到热平衡。内外壁温度达到热平衡所需的时间随着吸收体壁厚的增加而增长。对于紫铜吸收体材料而言,当壁厚为 5 mm 时,达到准平衡时间约为 100 ms,这就意味着通过吸收体外壁温度的测量可以给出 10 Hz 以内每个脉冲的能量。可见通过对吸收体结构的设计,不仅可以给出序列脉冲激光的总能量,而且还可以给出一定频率下每个脉冲的能量。

为了进一步说明采用传统的测量吸收体外壁温度增量能够反映入射脉冲激光总能量,及通过吸收体的设计能够获得一定序列数的单脉冲能量这两个问题,图 2 对大能量长脉冲激光与连续激光辐照下的吸收体温度响应特性进行了对比分析。同时通过改变吸收体壁厚的设计,图 3 对低重频率大能量长脉冲激光辐照下的吸收体温度特性也进行了分析。计算中在连续激光与脉冲激光的平均功率相同条件下进行比较。脉冲的重复频率为 50 Hz,脉冲宽度 1 ms,辐照总时间为 1 s,平均功率相同条件下连续激光与脉冲激光辐照在吸收体内表面的平均功率密度分别为 50 W/cm<sup>2</sup> 和 1 000 W/cm<sup>2</sup>。由图 2 可以看出,脉冲激光内表面温升较高,这对吸收体内表面抗激光损伤能力要求较高;外表面温度变化一致,说明可以采用传统的连续激光能量测量方式测量序列脉冲激光的总能量。从图 3 可以看出,当壁厚设计在 5 mm,重复频率为 10 Hz 时,在下一个脉冲来临之前吸收体内外壁温度达到热平衡,从而说明通过吸收体的设计可以实现对低重频单脉冲激光能量的测量。



(a) 激光辐照时间为 0.2 s

(a) Laser irradiation time is 0.2 s



(b) 激光辐照时间为 1 s

(b) Laser irradiation time is 1 s

图 1 吸收体温度随激光辐照时间的变化  
Fig.1 Variation of absorber temperature with laser irradiation time

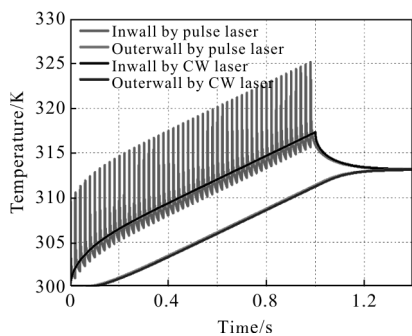


图 2 序列长脉冲激光与连续激光辐照下吸收体内外壁温度随时间的变化

Fig.2 Temperature variation of absorber inwall and outerwall with laser irradiation time by long pulse sequence and CW laser

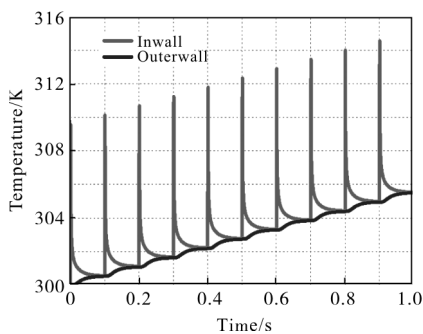


图 3 低重频长脉冲激光辐照下吸收体内外壁温度随时间的变化

Fig.3 Temperature variation of absorber inwall and outerwall with time irradiated by low repetition frequency long pulse laser

针对大能量序列长脉冲激光的能量测量而言,影响激光吸收体温升的因素主要有单脉冲能量、脉冲宽度及重复频率等,下面把这些因素对吸收体温度场的影响进行分析。图 4 给出了激光脉冲宽度为 1 ms,重复频率为 50 Hz,激光辐照总时间为 1 s 时,不同单脉冲能量下吸收体内壁温升最大值及此刻对应的外壁温升值。可以看出,随着单脉冲能量的增加,内壁温升最大值及对应的外壁温升值呈线性增加,内壁温升最大值较快于对应外壁的温升速度。

图 5 给出了脉冲宽度对吸收体内外壁温度场的影响。计算中单脉冲能量选取为 2 000 J,重复频率为 50 Hz,脉冲宽度 0.5~10 ms。由图 5 可以看出,单脉冲能量相同时,脉冲宽度越窄,即吸收体内表面辐照平均功率密度就越高,所以吸收体内壁温升就越

高。由于入射激光总能量相同,所以对于不同脉冲宽度的激光其吸收体外壁温升基本一致。

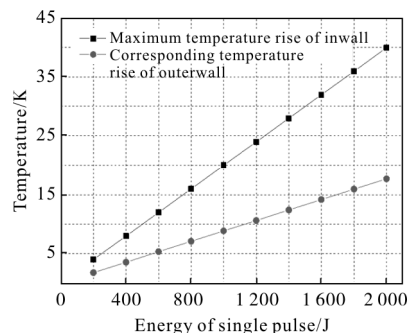


图 4 吸收体内外壁温升随单脉冲能量的变化

Fig.4 Temperature rise variation of absorber inwall and outerwall with single pulse energy

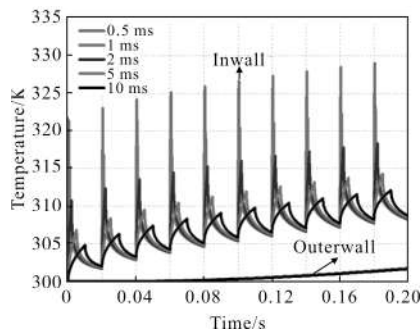
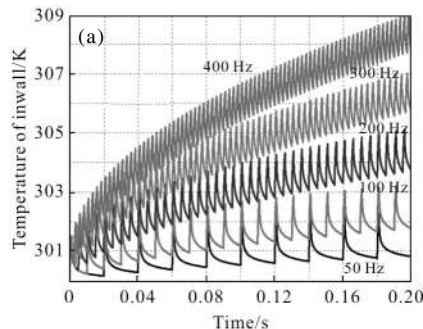


图 5 不同脉冲宽度下吸收体内、外壁温度随辐照时间的变化

Fig.5 Temperature variation of absorber inwall and outerwall with laser irradiation time when the pulse width is different

图 6 和图 7 给出了脉冲重复频率对吸收体温度场的影响。图 6 中单脉冲能量相同为 200 J,脉冲宽度为 1 ms,重复频率为 50~400 Hz。由图 6 可以看出单脉冲能量相同条件下,随着重复频率的增加,吸收体内外壁温度逐渐地增加。图 7 中取激光辐照时间 1 s 内脉冲总能量相同为 40 kJ,脉冲宽度为 1 ms 时,随着重复频率的增加,吸收体内壁温度最大值逐渐地降低,吸收体外壁温度基本一致。



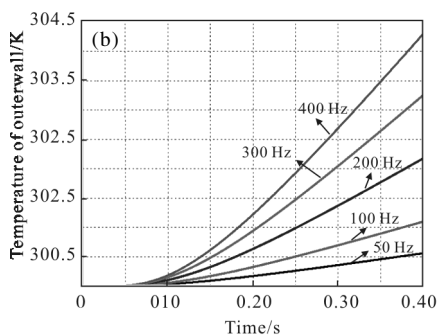


图 6 单脉冲能量相同时重复频率对吸收体内、外壁温升的影响

Fig.6 Influence of repetition frequency on the temperature rise of absorber inwall and outerwall when the single pulse energy is same

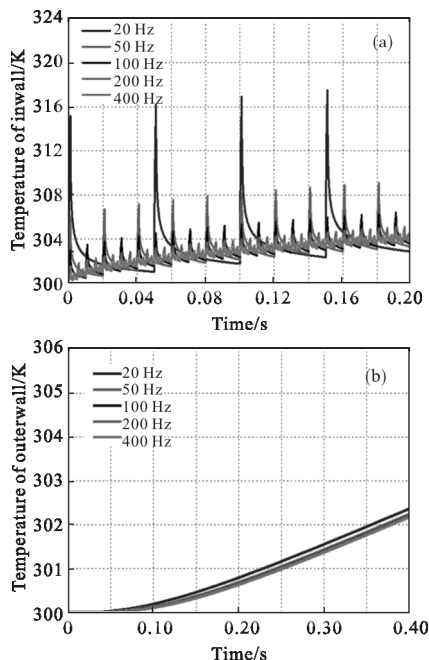


图 7 总能量相同时重复频率对吸收体内、外壁温升的影响

Fig.7 Influence of repetition frequency on the temperature rise of absorber inwall and outerwall when the total energy is same

### 3 结论

文中针对毫秒级大能量序列长脉冲激光特点,开展了激光能量计吸收体温度特性的数值分析研究。结果表明:吸收体内壁温度随脉冲结构呈间歇式的周期性振荡,振荡周期和振荡幅度与脉冲的重复频率及单脉冲能量等因素有关。吸收体外壁周期性振荡及振幅起伏现象基本消失,其温度随激光辐照时间逐渐增加。

总能量相同时,脉冲激光比连续激光辐照下的

吸收体内壁温升更高,这将更容易对吸收体内壁造成损伤;重复频率越高,吸收体内壁温升却越低。单脉冲能量相同时,脉冲宽度越窄,吸收体内壁温升越高;重复频率越高,吸收体内外壁温升也越高。

通过对吸收体结构的设计,不仅可以给出序列脉冲激光的总能量,而且还可以给出低重复脉冲激光的每个脉冲能量。通过文中的研究,能够为大能量长脉冲激光能量计的优化设计提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] Zhu Mengzhen, Wan Qiang, Liu Xu, et al. Study on coherent characteristic of solid state laser with corner cube resonator [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0906008. (in Chinese)  
朱孟真, 万强, 刘旭, 等. 角锥腔固体激光器相干特性的研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0906008.
- [2] Pan Qikun. Progress of mid-infrared solid-state laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 557-566. (in Chinese)  
潘其坤. 中红外固体激光器研究进展[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 557-566.
- [3] Fu Xihong. Diode-pumped all-solid-state sum-frequency mixing laser at 608.1 nm [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 794-799. (in Chinese)  
付喜宏. LD 泵浦全固态 608.1 nm 和频激光器[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 794-799.
- [4] Gan Qijun, Jiang Benxue, Zhang Pande, et al. Research progress of high average power solid-state Lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54: 010003. (in Chinese)  
甘啟俊, 姜本学, 张攀德, 等. 高平均功率固体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54: 010003.
- [5] Cheng Yong, Zhu Mengzhen, Ma Yunfeng. Mechanism and effects of complex laser ablation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1105005. (in Chinese)  
程勇, 朱孟真, 马云峰, 等. 激光复合损伤机理与效应研究[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(11): 1105005.
- [6] Song Wei, Zhang Yanan, Shen Linyong. Target positioning in high power laser device [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 520-527. (in Chinese)  
宋薇, 章亚男, 沈林勇. 高功率激光装置中靶的定位调试[J]. 光学精密工程, 2015, 23(2): 520-527.
- [7] Lu Yaodong, Shi Hongmin, Qi Xue, et al. Integrated sphere

- application in the field of powerful laser energy measurement [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 12(s0): 106–108. (in Chinese)
- 陆耀东, 史红民, 齐学等. 积分球技术在高能激光能量测量中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2002, 12(s0): 106–108.
- [8] Wei Jifeng, Jiang Zhixiong, Lu Fei. Design of graphite-cone-absorption-cavity absolute energy meter for high energy laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 0208006. (in Chinese)
- 魏继峰, 蒋志雄, 卢飞, 等. 石墨锥型高能激光全吸收能量计设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0208006.
- [9] 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): 438–440. (in Chinese)
- 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): 438–440.
- [10] 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)
- 魏继峰, 卢飞, 蒋志雄, 等. 阶梯反射锥形高能激光能量计温度场控制技术[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(12): 121001.
- [11] 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.
- [12] Su Yi, Wan Min. High Energy Laser System [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004: 240–241. (in Chinese)
- 苏毅, 万敏. 高能激光系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 240–242.
- [13] Wang Lei, Yang Zhaojin, Li Gaoping, et al. Research on temperature characteristics of absolute energy meter for high-energy laser [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(5): 29–32. (in Chinese)
- 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.
- [14] Liu Guorong, Wu Hongcai. Influence of temperature difference between inner and outer surface of calorimetric laser energy meter on measurement result [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(S): 154–156. (in Chinese)
- 刘国荣, 吴洪才. 量热式激光能量计内外表面温差对测量结果的影响[J]. *光子学报*, 2007, 36(S): 154–156.
- [15] Luo Huaping, Yang Gaochao, Song Zhengfang, et al. Metal heat response duration to CW laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(3): 427–430. (in Chinese)
- 罗华平, 杨高潮, 宋正方, 等. 金属材料对连续激光的热响应[J]. *量子电子学报*, 2005, 22(3): 427–430.
- [16] Li Nan, Luo Huaping, Yang Gaochao, et al. The numerical calculation for the thermal effect of metal spherical shell irradiated by laser [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2009, 26(3): 366–370. (in Chinese)
- 李南, 罗华平, 杨高潮, 等. 金属球壳在激光辐照下热效应的数值计算[J]. *量子电子学报*, 2009, 26(3): 366–370.
- [17] Zhao Falin, Xu Jun, Xu Yibin, 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)
- 赵法林, 徐军, 许毅芬, 等. 高能激光能量计吸收腔的温度特性[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 825–829.
- [18] 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. (in Chinese)
- 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.
- [19] Wei Chenghua, Wang Lijun, Liu Weiping, et al. Thermal response of 45# steel coupling with multi-layer oxide film evolution by laser radiation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(8): 2061–2066. (in Chinese)
- 韦成华, 王立君, 刘卫平, 等. 基于多层氧化膜演化的45#钢激光辐照热效应[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8): 2061–2066.