

全吸收旋转式高能激光能量计吸收腔设计

王振宝,冯国斌,陈绍武,杨鹏翎,吴 勇

(西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室,陕西 西安 710024)

摘要:为了解决高能激光总能量测量中所面临的抗激光损伤能力问题,设计了一种新型旋转式全吸收激光能量计,具有测量不确定度低、系统结构简单、环境适应性强等诸多优点,尤其在长时间出光的强激光能量测量中具有独特优势。光线追迹软件数值模拟结果表明激光辐照过程中能量逃逸率小于 0.3%。利用有限元软件,模拟计算了连续激光辐照下能量吸收体的温度场分布和最高温升情况,给出了热吸收体最高温升与旋转速度的关系,分析了测温探测器安装深度对温度传感器测温曲线的影响。该旋转式能量计完全可以满足数十兆焦耳激光能量测量要求,也为更高能量的激光参数测试提供了一种全新的技术手段。

关键词: 旋转式能量计; 高能激光; 全吸收; 抗激光损伤

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1217010

Design and analysis of absorbing cavity in full absorbing HEL rotational calorimeter

Wang Zhenbao, Feng Guobin, Chen Shaowu, Yang Pengling, Wu Yong

(State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The method full absorbing is the most commonly technique to measure total energy of high energy laser (HEL), which is one of important technical indexes for parameters test of HEL. In order to improve the ability of laser damage resistance, in comprehensive consideration of work mode and temperature field distribution of energy absorbing graphite, a novel HEL rotational calorimeter was designed. The calorimeter especially applicable to laser long-time irradiation has a series of advantages, such as low measurement uncertainty, uncomplicated configuration and environmental adaptability. Numerical simulation results through method of ray tracing show that laser energy loss is less than 0.3 percent. The software based on finite element method was used to analyze temperature field distribution and maximum of absorb material, rotate speed-dependent temperature, temperature curve at the different positions of temperature sensor. Simulation results indicate that the calorimeter can be applied to several ten million joule (MJ) energy of HEL successfully, and provides a novel technique way for measurement of higher laser energy.

Key words: rotational calorimeter; high energy laser; full absorbing; laser damage resistance

收稿日期:2016-04-10; 修订日期:2016-05-11

作者简介:王振宝(1981-),男,副研究员,硕士,主要从事激光参数测量方面的研究。Email:zhenbao_wang98@163.com

0 引言

在 高 能 激 光 参 数 测 量 中， 激 光 总 能 量 是 一 个 最 基 本 也 是 最 为 重 要 的 指 标 参 数， 常 采 用 光 热 法 测 量^[1-3]， 例 如 将 激 光 入 射 至 石 墨 等 材 料 制 成 的 圆 锥 形 吸 收 体 上， 吸 收 体 吸 收 入 射 激 光 的 能 量 并 转 化 成 自 身 的 温 升， 通 过 测 量 温 升 从 而 推 算 得 到 高 能 激 光 的 总 能 量^[4-6]。 随 着 激 光 功 率 密 度 的 大 幅 提 升 和 出 光 时 间 的 延 长， 如 何 提 高 吸 收 体 抗 激 光 破 坏 阈 值 成 为 测 量 系 统 的 关 键 技 术， 急 需 新 的 思 路 去 解 决。 现 有 的 全 吸 收 能 量 计 在 高 能 激 光 能 量 测 量 中， 吸 收 体 激 光 辐 照 表 面 要 承 受 全 部 的 长 时 间 激 光 辐 照， 其 抗 激 光 损 伤 和 破 坏 能 力 将 成 为 其 技 术 瓶 颈， 目 前 常 采 用 的 方 法 有 两 种： 光 热 吸 收 体 水 循 环 制 冷 法^[7]和 吸 收 体 表 面 喷 镀 抗 激 光 辐 照 膜 层 的 方 法^[8]， 这 两 种 方 法 在 提 高 破 坏 阈 值 的 能 力 方 面 十 分 有 限， 并 且 增 加 了 系 统 的 复 杂 性 和 维 护 难 度。

文 中 提 出 了 一 种 用 于 长 时 间 出 光 的 激 光 能 量 计， 热 吸 收 体 激 光 辐 照 表 面 远 大 于 光 斑 面 积， 并 通 过 旋 转 热 吸 收 体 实 现 激 光 辐 照 面 在 热 吸 收 体 的 上 位 置 变 化， 使 得 整 个 热 吸 收 体 的 激 光 辐 照 表 面 得 到 均 匀 辐 照， 避 免 常 规 能 量 计 中 只 是 热 吸 收 体 的 局 部 表 面 承 受 强 光 辐 照 而 导 致 的 吸 收 体 破 坏， 大 大 降 低 了 辐 照 到 热 吸 收 体 表 面 上 的 平 均 激 光 能 量 密 度， 提 高 了 吸 收 体 的 抗 激 光 破 坏 阈 值。 此 外， 考 虑 吸 收 腔 体 所 使 用 的 石 墨 材 料 对 于 不 同 波 长 激 光 的 光 热 耦 合 效 率 问 题， 并 且 在 保 证 全 吸 收 结 构 设 计 的 前 提 下， 该 结 构 基 本 可 以 满 足 所 有 波 长 高 能 激 光 的 能 量 测 量 和 抗 损 伤 设 计 要 求。

1 总体设计

基 于 全 吸 收 方 案 的 高 破 坏 阈 值 的 激 光 能 量 计 原 理 图 如 图 1 所 示。 主 要 包 括 可 绕 中 心 轴 旋 转 的 热 吸 收 体、 温 度 传 感 器 和 温 度 采 集 处 理 单 元， 其 中 温 度 传 感 器 为 按 照 一 定 空 间 分 布 嵌 入 在 热 吸 收 体 内 的 热 电 偶 阵 列， 用 于 采 集、 记 录 温 度 值 并 处 理 计 算 得 到 激 光 的 能 量 参 数。 当 入 射 高 能 激 光 到 达 光 热 测 量 单 元 时， 光 热 测 量 单 元 吸 收 入 射 激 光 能 量 并 转 化 自 身 温 升， 利 用 温 度 传 感 器 阵 列 对 光 热 测 量 单 元 温 度 变 化 进 行 实 时 测 量， 最 后 由 数 据 采 集 处 理 单 元 对 温 度 传 感 器 阵 列 测 量 得 到 的 温 度 信 号 进 行 记 录 和 处 理， 最 终 得 到 入 射 高 能 激 光 的 总 能 量。

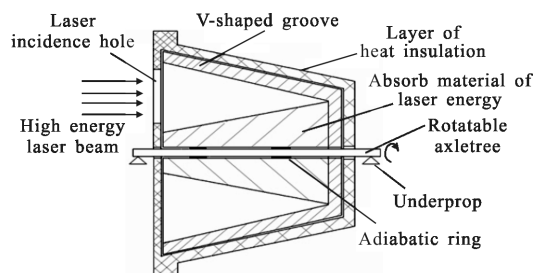


图 1 旋转式全吸收能量计示意图

Fig.1 Schematic diagram of full absorbing HEL rotational calorimeter

2 吸收腔体设计

2.1 热吸收腔体结构设计

热 吸 收 体 中 心 设 置 有 转 轴， 可 使 热 吸 收 体 和 温 度 采 集 处 理 单 元 绕 转 轴 旋 转； 热 吸 收 体 的 迎 光 面 上 开 有 环 状 V 型 槽， 环 状 V 型 槽 的 内 表 面 为 漫 反 射 面； 环 状 V 型 槽 的 目 的 在 于 增 大 激 光 辐 照 面 积， 降 低 辐 照 到 热 吸 收 体 表 面 的 平 均 功 率 密 度； 同 时 通 过 旋 转 热 吸 收 体， 可 对 辐 照 在 能 量 测 量 装 置 的 热 吸 收 体 表 面 上 的 激 光 光 斑 进 行 位 置 调 节， 高 能 激 光 束 在 热 吸 收 体 的 环 状 V 型 槽 结 构 迎 光 面 循 环 扫 描， 避 免 常 规 测 量 中 只 是 热 吸 收 体 局 部 表 面 承 受 强 光 辐 照 而 导 致 的 吸 收 体 破 坏， 大 大 降 低 了 辐 照 到 热 吸 收 体 表 面 上 的 平 均 激 光 能 量 密 度， 提 高 了 热 吸 收 体 的 抗 激 光 破 坏 阈 值。 热 吸 收 体 材 料 可 选 用 石 墨 或 铜 等。 文 中 所 涉 及 的 模 拟 计 算 中 的 热 吸 收 体 材 料 在 未 特 殊 说 明 的 情 况 下 均 指 高 纯 石 墨。

热 吸 收 体 设 计 效 果 图 如 图 2(a) 所 示。 同 时， 为 提 高 能 量 计 测 量 精 度， 降 低 激 光 逃 逸 和 热 辐 射 引 起 的 能 量 损 失， 在 对 系 统 整 体 绝 热 设 计 的 基 础 上 设 计 能 量 收 集 罩， 如 图 2(b) 所 示。 能 量 收 集 罩 设 置 有 激 光 入

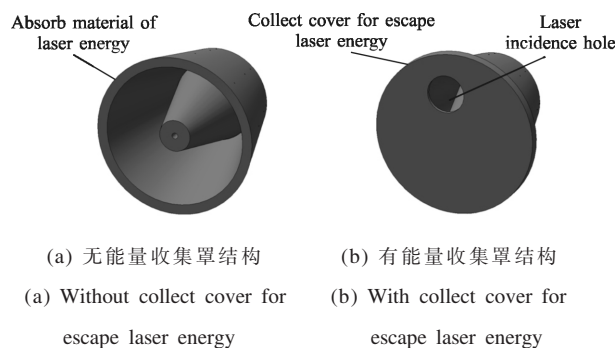


图 2 热吸收体结构设计图

Fig.2 Structure design of heat absorber

射孔,且在工作中相对入射激光而言位置固定,不随热吸收体一同旋转。

为验证所设计的旋转式激光能量测量方案在提高抗激光损伤能力的有效性,利用有限元数值分析软件对相同入射激光参数条件下热吸收体的温升进行了数值模拟。数值模拟中的激光参数为:模拟入射激光总能量为 10MJ,光斑直径为 20cm,均匀光斑,初始环境温度为 20℃。从抗激光损伤设计方面考虑,激光辐照表面与入射激光光斑面积之比越大,吸收体激光辐照表面实际接收的激光能量密度越低。以文中的计算结构

为例,二者比例大于 45:1,即该旋转式吸收腔体在激光能量测量过程中,能量密度相比于初始光斑下降了 45 倍。此外,入射激光光斑半径与入射到吸收体表面的面积之比代表了吸收体激光辐照表面接收的瞬时激光功率密度的变化,在文中的计算结构中二者比例小于 1:5,即吸收体表面所接收的入射激光的瞬时功率密度相比初始光斑下降了 5 倍以上。

在旋转速度由 $0 \sim 2\pi/0.75$ rad/s 变化的情况下,图 3 给出了热吸收体温度场分布和最高温升情况。

图 3 数值模拟的结果表明,在入射激光参数相

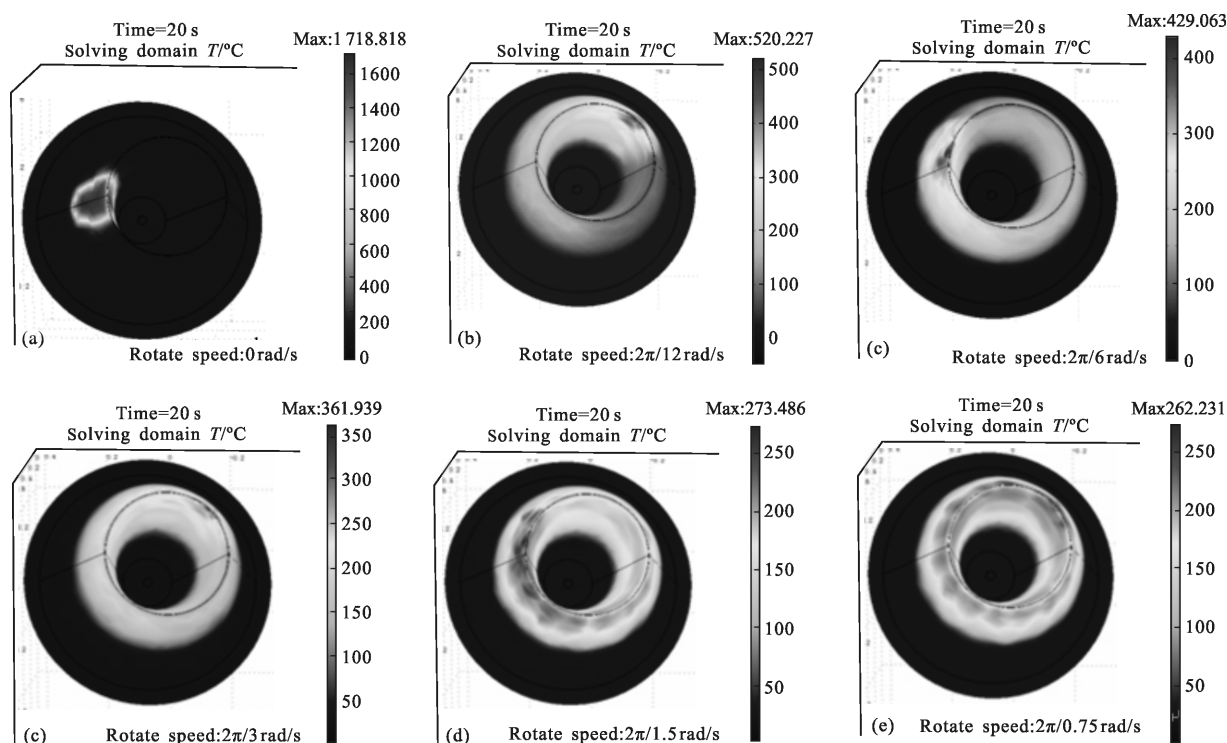


图 3 热吸收体温度场分布及最高温升数值模拟结果

Fig.3 Numerical simulation results for temperature field distribution and maximum temperature of heat absorber

同的条件下,热吸收体不旋转时,其温升在入射激光结束时达到最大值约 1700℃,如此高的温度不仅会导致热吸收体材料的烧蚀气化,而且会损失一部分激光能量,对测量结果造成影响;在热吸收体旋转时,其温升最大值相比于不旋转时将有显著下降,随着旋转速度从 $2\pi/12$ rad/s $\sim 2\pi/0.75$ rad/s 变化,温升最大值由 520℃降至 260℃。该结果有力地证明了旋转式激光能量测量方案可以有效提高系统的抗激光损伤能力。

图 4 给出了热吸收体最高温升与旋转速度关系曲线。

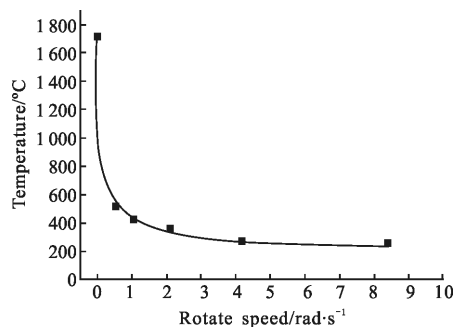


图 4 热吸收体最高温升与旋转速度关系数值模拟结果

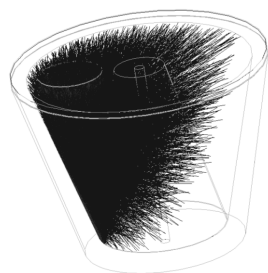
Fig.4 Numerical simulation results for rotate speed-dependent maximum temperature of heat absorber

通过分析可以看出,随着旋转速度的不断提高,热吸收体的最大温升逐步降低并最终趋于稳定,即旋转速度降至 $2\pi/1.5$ rad/s 时,继续增加旋转速度对有效降低热吸收体整体温升效果有限,因此对于旋转式高能激光能量计的设计而言,存在一个最优的旋转速度值。

文中对该装置模拟同样适用于高斯光束的能量测量。相对于相同功率/相同光斑尺寸的均匀光斑而言,高斯光斑峰值功率密度较高,可以相应地增加吸收腔体的旋转速度。

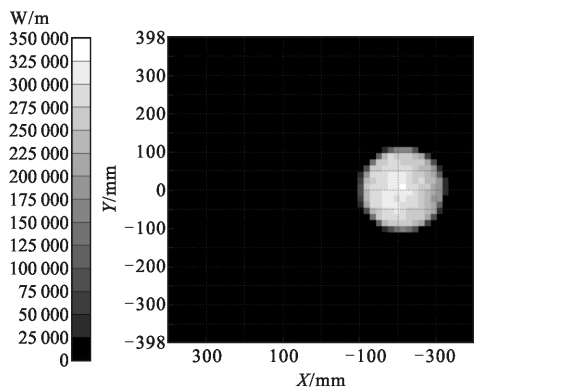
2.2 激光能量逃逸计算

锥形吸收腔表面所产生的后向散射光会造成一部分激光能量的损失^[9]。利用光线追迹软件数值模拟了能量计热吸收腔体在激光辐照过程中激光能量的逃逸情况。激光入射孔直径 20 cm,热吸收体材料表面反射率 10%。热吸收腔体激光能量逃逸数值模拟结果如图 5 所示。



(a) 吸收腔体内光线反射情况

(a) Scheme of laser reflection in absorb cavity



Irradiance Min:0 W/m? Max:3.302 5e+005 W/m? Ave:15 245 W/m?
RMS:62 583,Total flux:9 659.2 W 96 592 incident rays

(b) 逃逸激光光斑

(b) Facula of escape laser

图 5 热吸收体激光能量逃逸数值模拟结果

Fig.5 Numerical simulation results of escape laser energy from heat absorber

光线追迹的结果表明,在增加了激光能量收集罩后,激光能量逃逸率小于 0.3%,相比于未加能量收集罩时的激光能量逃逸率 1.3%有明显的改善。

2.3 测温点布局

相比于传统能量计温度传感器排布方式而言,旋转式能量计吸收腔体温度传感器排布不仅要准确反映出吸收体的整体温升情况,而且要确保能量计旋转频率对温度传感器输出信号不能产生影响。将整个吸收体沿锥体母线方向依次划分成 8 等份,考虑激光辐照位置及温升情况,温度探测器阵列采用吸收体底部及侧部按照等间距均布的方式,可以确保较高的测温精度。在激光辐照过程中吸收体处于旋转状态,因此温度探测器安装在吸收体上不同深度对测量结果具有一定的影响。数值模拟中,取热电偶测温点位置与吸收体激光辐照内表面距离分别为 $0.1d$ 、 $0.2d$ 、 $0.3d$ 、 $0.4d$ 、 $0.5d$ 、 $0.6d$ 和 $0.7d$ 的位置上,可以计算得到不同测温点位置在激光辐照时温度变化曲线如图 6 所示。数值模拟时吸收体厚度 d 为 50 mm。

根据图 6 中的结果可以看出,温度传感器的测温位置处于吸收体壁 $0.1d$ ~ $0.2d$ 位置时,能量计旋转频率对温度传感器输出信号影响十分明显,温度传感器的测温位置处于吸收体壁 $0.4d$ 至后表面时,能量计旋转频率对温度传感器输出信号的影响可以忽略。根据上述分析设计的能量计的传感器位置为 $0.4d$,在每个等份上均匀布放 5 支温度传感器,总计安装温度传感器 40 支。

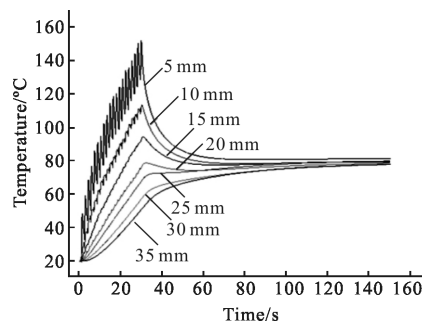


图 6 温度传感器安装深度对测温曲线的影响

Fig.6 Temperature curve affected by temperature sensor installation depth

3 温升测量及能量还原

根据前面的分析结果,对所设计的旋转时激光

能量计整体温升和能量还原进行数值模拟。假设激光辐照时长 20 s, 入射激光能量 10 MJ, 光斑直径 20 cm, 旋转速度 $2\pi/1.5$ rad/s, 吸收体材料四周为绝

热环境, 吸收腔壁厚 5 cm。图 7 给出了不同时刻热吸收体温度场分布情况。

在绝热边界条件下, 能量计与外界的热传导和

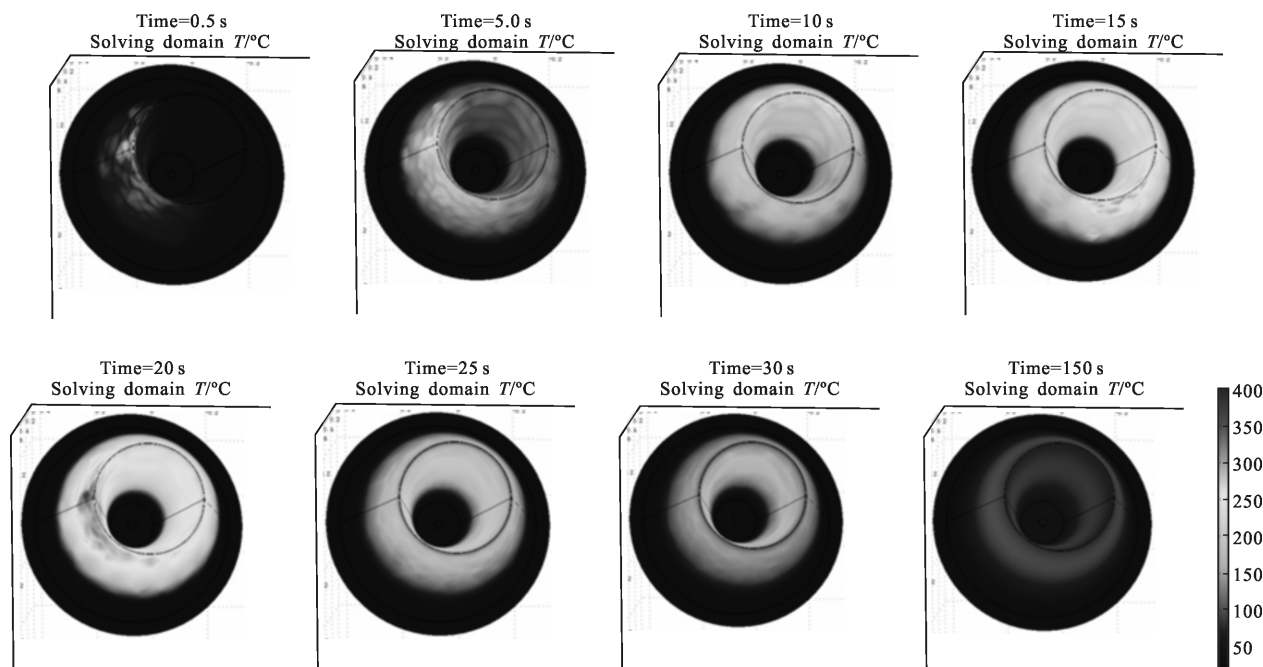


图 7 不同时刻热吸收体温度场分布

Fig.7 Numerical simulation results for temperature field distribution of heat absorber at the different time

对流换热造成的能量损失为零, 在能量还原时仅考虑激光入射孔处的能量逃逸造成的损失。作为体平衡的热吸收体模块, 其内部温升与能量对应的关系如下:

$$E = \int_{T_0}^{T_i} m C_p(t) dT + Q(t) \quad (1)$$

式中: $T_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{i,t}$ 为热吸收体平均温升值, n 为温度传感器数量, $T_{i,t}$ 为第 i 路温度传感器在 t 时刻的温度值; T_0 为初始时刻热吸收体温度; m 为热吸收体质量; $C_p(t)$ 为热吸收体热容; $Q(t)$ 为逃逸能量值。

按照上述激光辐照条件, 数值模拟得到了图 8 所示的热吸收体温升曲线。

数值模拟结果表明, 由于热吸收体中布放的温度传感器距离激光辐照表面有一定的距离, 整个系统达到热平衡的时间相比于激光辐照时长有明显滞后, 该模拟中激光辐照时长为 20 s, 系统热平衡时间约为 130 s。并且在选择合适的温度传感器布放位置后, 能量计旋转频率对系统平均温度信号无影响。

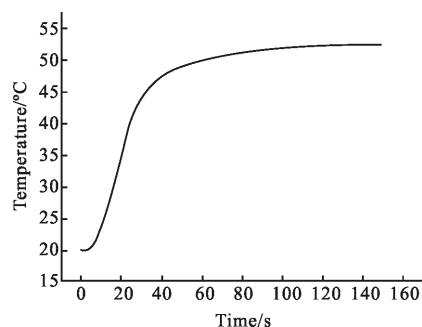


图 8 热吸收体温升曲线数值模拟结果

Fig.8 Numerical simulation results for temperature curve of heat absorber

在实际应用过程中能量计不可能做到完全隔热, 需要根据热吸收体平均温升曲线判断温度平衡的时刻, 再选取适当的曲线段进行后沿拟合计算得到真实能量。

4 结论

面向未来更高能量密度、长脉冲高能激光总能量测试需求, 为提高能量计抗激光损伤能力, 提出了

旋转式激光能量测试量的技术思路。通过有限元模拟、光线追迹计算完成了能量计整体结构设计、温度传感器布局设计和能量还原计算,给出了旋转式能量计的最佳旋转速度,温度传感器的适宜测温深度。数值模拟的结果表明,旋转式激光能量计在抗激光损伤能力方面具有明显的优势,完全可以满足数十兆焦耳激光能量测量要求,为更高能量的激光参数测试提供了一种全新的技术手段。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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): 2399–2403. (in Chinese)
 魏继锋, 关有光, 周山, 等. 高能激光能量测量装置的现场标定方法[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2399–2403.
- [3] 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(S1): 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(S1): 154–156.
- [4] Ji Yunfeng, Xie Yongjie, Duan Liuhua, et al. Laser irradiating distribution measurement based on diffuser reflectance and calorimetry technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 86–88. (in Chinese)
 戢运峰, 谢永杰, 段刘华, 等. 复合热像法定量测量红外激光辐照度分布[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(1): 86–88.
- [5] Wei Jifeng, Jiang Zhixiong, Lu Fei, et al. Design of graphite-cone-absorption-cavity absolute energy meter for high energy laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0208006. (in Chinese)
 魏继锋, 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.
- [6] 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.
- [7] Liu Weiping, Duan Liuhua, Ji Yunfeng, et al. Modeling of temperature response of water-cycled laser calorimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1494–1498. (in Chinese)
 刘卫平, 段刘华, 戢运峰, 等. 水循环式激光能量计温度响应建模[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(6): 1494–1498.
- [8] Wang Zhenbao, Wu Yong, Yang Pengling, et al. Numerical simulation and experiment on temperature fields distribution of aluminum target under intensive laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2061–2065. (in Chinese)
 王振宝, 吴勇, 杨鹏翎, 等. 强激光辐照铝靶温度分布数值模拟及实验研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2061–2065.
- [9] 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. (in Chinese)
 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.