

文章编号: 0258-7025(2009)02-0333-05

瞬态温度变化对大口径光学元件的影响

张军伟^{1,2} 周 忆¹ 周 海² 林东晖¹ 冯 斌² 景 峰² 王时龙¹

(¹ 重庆大学机械工程学院机械电子工程系, 重庆 400030)
(² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 温度瞬变是影响惯性约束聚变(ICF)驱动器中大口径光学元件结构稳定性的一个重要的激励因素。采用多通道高精度温度监测仪对原型装置中编组站大口径光学元件环境温度进行了 24 h 监测,得到了编组站光学元件环境温度 24 h 温度变化曲线;采用有限元分析软件建立了光学元件的有限元模型,把温度监测结果作为载荷,对光学元件进行了热结构耦合分析。分析得到了大口径光学元件面形在 24 h 内的变化曲线,光学元件环境温度 24 h 内最大变化范围为 0.45 °C,24 h 光学元件最大转角变化为 1.12 μ rad。分析结果表明,光学元件转角最大变化已超过打靶对光学元件稳定性的要求,但通过调整打靶时间,缩短光路准直之后打靶的等待时间可有效提高打靶的成功率。

关键词 光学器件;惯性约束聚变驱动器;大口径光学元件;温度瞬变;稳定性

中图分类号 TL632⁺.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0333

Effect of Transient Change of Temperature on Large-Aperture Optical Element

Zhang Junwei^{1,2} Zhou Yi¹ Zhou Hai² Lin Donghui¹
Feng Bin² Jing Feng² Wang Shilong¹

¹Department of Mechanical Electronic Engineering, College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China

²Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract Transient change of temperature is an important exciting factor which affects the structure stability of large-aperture optical element in the inertial confinement fusion (ICF) driver. Multi-channel high-precision temperature monitoring instrument is adopted to measure the circumstance temperature of large-aperture optical element in the switchyard of the technical integration line (TIL) for 24 h. The temperature changing curve with time is got. The finite element software is used to build the finite element model for the optical element is built. With the measured temperature as the load, the plane rotation curve of the large-aperture optical element in 24 h is analyzed. During 24 h, the circumstance temperature change is 0.45 °C, and the maximum rotation angle is 1.12 μ rad. The results indicate that the largest rotation of the optic element exceeds the requirement of beam shot change range, but the success ratio of beam shot can be improved by adjusting beam shot time and reducing waiting time between alignment and beam shot.

Key words optical devices; inertial confinement fusion driver; large-aperture optical element; transient change of temperature; stability

1 引 言

结构稳定性是惯性约束聚变(ICF)驱动器一个重要的设计指标,它直接关系到驱动器中光束在靶球的定位以及激光能量的转换效率。国外在 ICF

驱动器建设过程中,对驱动器的稳定性做了大量的研究工作^[1,2],并给出了对驱动器稳定性有影响的环境载荷的稳定性设计指标,温度瞬变是影响驱动器稳定性的诸多因素之一,目前世界上最大的 ICF

收稿日期:2008-05-06;收到修改稿日期:2008-07-07

基金项目:国家 863 计划资助项目。

作者简介:张军伟(1981—),男,博士研究生,主要从事机电系统分析方面的研究。E-mail:zjw425@163.com

导师简介:王时龙(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事先进制造技术方面的研究。E-mail:SLWANG@cqu.edu.cn

驱动器——国家点火装置(NIF)对温度瞬变提出了很高的设计要求^[1]。温度瞬变对 ICF 驱动器稳定性的影响主要体现在温度的变化影响光学元件的变形,进而影响光束的指向,导致激光束偏离已准直位置,造成打靶失败。随着 ICF 驱动器输出能力的提高,对光学元件的口径要求越来越大^[3],温度瞬变对大口径光学元件变形的影响是一个不可忽视的因素^[4~7]。打靶过程是一个动态过程,它要求大口径光学元件的变形在 2 h 内保持在稳定性指标范围内,通过对 2 h 内最大温度变化对光学元件变形的影响可以了解在一个时间段内光学元件的最大变形^[8],但不知道在该时间段内光学元件的变形过程,不能对打靶时间有一个合理的分布。温度瞬变是由日温度变化和装置热源共同作用的结果,研究 24 h 内温度变化对大口径光学元件变形的影响,优化打靶时间,可以有效提高打靶成功率。

2 温度测试

准确的温度测试是进行分析的基础,本次温度测试采用的仪器为 PC-2WS 多通道温度监测记录仪,采用 PTWD-2A 精密温度传感器,测试精度为 0.1 °C,测试之前测试仪器在中国工程物理研究院计量测试中心进行了标定。温度传感器测点布置示意图如图 1 所示。

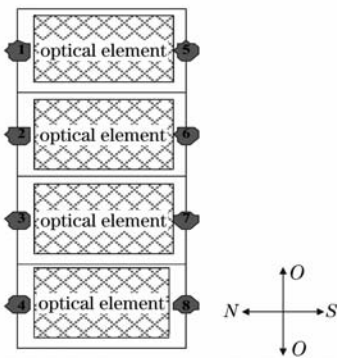


图 1 传感器测点布置示意图

Fig. 1 Sketch of sensor measuring points distribution

在测试过程中,物理实验(当天实验进行三次,时间分别为 10:10, 14:45, 17:20)在同步进行,这样可以真实地记录打靶过程中温度的瞬时变化,但由于在激光的传输光路中不能有障碍物,从而限制了温度传感器的布置方式。考虑到不能遮挡光路同时避免对光学元件的划伤,测点布置在大口径光学元件的两侧,每个光学元件周围温度的变化有两个温度传感器进行采集,采集时间持续近 40 h,每分钟记录 1 个数据点。为了分析一天内温度的变换,图 2

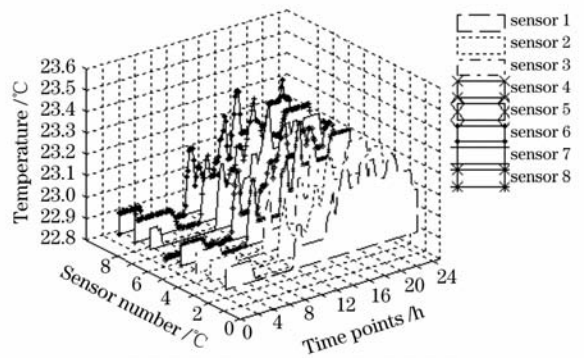


图 2 不同通道传感器温度随时间的变化曲线

Fig. 2 Temperature changing with time for different channel sensors

给出了 24 h(0:00~24:00)温度变化曲线。

在进行测试结果处理时,考虑到偶然因素的影响,对测试结果进行了滑动平均处理以减小随机误差。测试结果显示,在 24 h 内,编组站温度波动达到了 0.45 °C,温度最低点出现在凌晨 3:00,温度高点出现在 14:00,出现这种情况的原因主要是温度变化受外部气温变化的影响,以及工作期间人员、设备的影响。物理打靶实验对编组站大口径光学元件环境温度影响有限,从图中看出物理实验前后温度曲线没有明显的变化,其主要原因是编组站远离抽运源,物理实验激光发射很短。在工作期间(8:00~18:00)温度变化为 0.35 °C。从图 2 来看,8 个通道温度传感器测得的温度变化基本上是一样的,而编组站中四个大口径光学元件的结构、材料都是一样的,在后面的有限元分析中为了减少模型规模,提高单个光学元件的计算精度,不再建立编组站的整个模型,只对一个光学元件进行建模与分析。

3 光学元件建模与分析

光学元件的材料是各向同性的,在热载荷作用下,如果没有受到约束,其在各个方向自由膨胀,不会产生应变,对激光束的传输不会有影响。但由于镜框的存在,镜框与光学元件材料不同,热膨胀系数有差别,在相同的热载荷作用下,产生不同的变形,从而导致了应变的产生,镜面出现影响光束指向性的变形,因此在有限元分析时需建立光学元件和镜框的完整模型。在建模过程中,对模型结构中的部分细节进行了简化。编组站大口径光学元件模型尺寸长宽高分别为 540 mm, 340 mm, 60 mm。镜片由镜框支撑,其模型如图 3 所示,在有限元模型中,镜片和镜框都采用 90 单元,网格划分生成 4464 个单元,镜片和镜框在实际中采用胶接,在这里把它们粘

结处理,在螺栓孔处对镜框进行垂直镜面(z 向)方向约束(镜框和镜架的材料是一样的,因此其他两个方向没有受到约束),在镜面中心节点对其施加 x,y 约束。光学元件和镜框网格模型如图4所示。

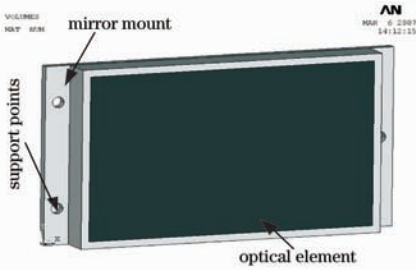


图3 光学元件三维模型

Fig. 3 Three-dimensional (3D) model of optical element

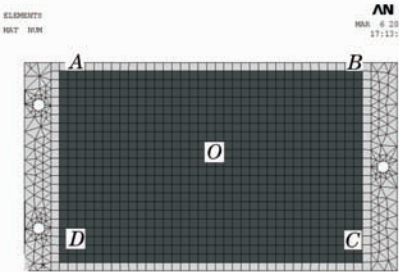


图4 光学元件有限元模型

Fig. 4 Finite element model of optical element

镜框材料为45#钢,镜片材料为K9玻璃,它们的材料参数如表1所示。

表1 大口径光学元件材料参数

Table 1 Material parameters of large-aperture optical element

	Material	
	45# steel	K9
Thermal expansion coefficient /($m^{\circ}C$)	1.1×10^{-5}	8.5×10^{-6}
Elastic moduli /Pa	2.00×10^{11}	8.13×10^{10}
Poisson's ratios	0.30	0.17
Specific heat coefficient /($J/(kg \cdot K)$)	460	840
Thermal conductivity coefficient /($W/(m \cdot K)$)	48	12.07
Density /(kg/m^3)	7850	2510

在进行大口径光学元件瞬态温度稳定性分析时,光学元件所加温度载荷为通道1传感器所测温度载荷,其24 h温度变化曲线如图5所示。

在进行分析时,温度载荷施加到每个节点上,图6为计算过程中节点温度变化,经过432步迭代,得到了光学元件在温度载荷作用下的变形情况。图7为温度最低时光学元件的变形,图8为光学元件在

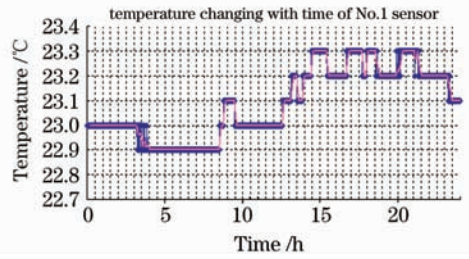


图5 温度随时间变化曲线

Fig. 5 Temperature changing with time

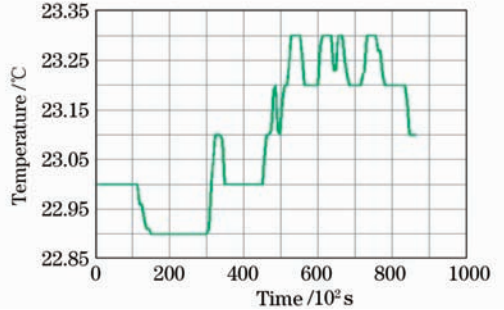


图6 节点温度变化曲线

Fig. 6 Node temperature change curve

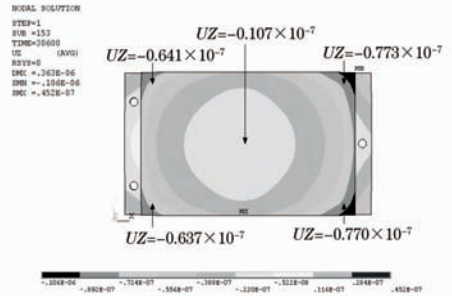


图7 温度最低时光学元件的变形

Fig. 7 Deformation of optical element at the lowest temperature

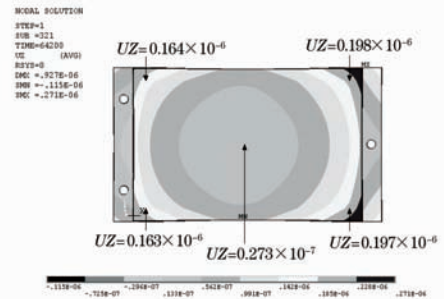


图8 温度最高时光学元件的变形

Fig. 8 Deformation of optical element at the highest temperature

温度最高时的变形。

图7中光学元件的变形呈“凸”形,主要是因最低点的温度为 $22.9^{\circ}C$,较参考温度($23^{\circ}C$)低,这种情况下无论是镜框还是光学元件都处于一个收缩状

态,由于 45# 钢的热膨胀系数较 K9 玻璃的热膨胀系数大,在温度降低时镜框对光学元件有一个压缩的作用,造成光学元件中心的凸起。而在图 8 中,温度处于高点 23.35 °C,此时镜框对光学元件是一个拉伸的作用,使光学元件呈“凹”形。编组站光学元件对光束的影响主要体现在对光束的指向性上,光学元件对光束指向性的影响主要是由于镜面的转角造成的,主要分析大口径光学元件镜面转角的变化。由于在软件中不能直接计算得到镜面的转角,因此在镜面上选取了 5 个点,分别为 A, B, C, D, O(图 4),其对应的节点编号分别为 2220, 4332, 4372, 2260, 3264。AO, BO, CO, DO 之间的距离分别为 293 mm, 306 mm, 306 mm, 293 mm。

图 9 为所选节点位移随时间的变化曲线,对比图 6 可见,节点位移随时间变化趋势与温度随时间变化趋势有严格的一致性,尽管不同节点位移幅值不一样,但其变化趋势是一样的。在 A, B, C, D, O 5 个节点中, A, D 的位移变化幅值比较接近,而 B, C 节点位移变化幅值比较接近,同时 B, C 节点的位移大于 A, D 节点的位移,这与光学元件的支撑调节方式有关,在 B, C 节点一端只有一个支撑点,对该端限制较小,造成了变形的增大。节点 O 的位移较其他所选节点位移小,无论在温度低点还是在温度高点,其波动幅度不大。24 h 内所选节点的最大位移、最小位移及位移变化范围见表 2。

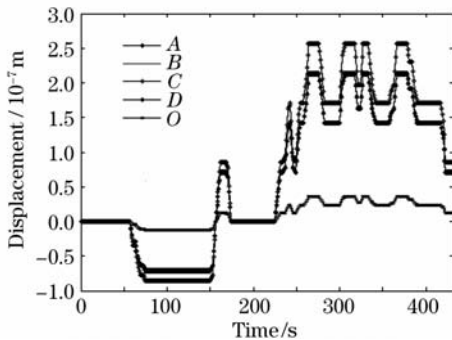


图 9 所选节点位移随时间的变化曲线

Fig. 9 Nodes displacement changing with time

表 2 节点位移变化范围

Table 2 Change range of nodes displacement

Node number	Minimum displacement /m	Maximum displacement /m	Change range /m
A	-0.712×10^{-7}	0.214×10^{-6}	0.2852×10^{-6}
B	-0.859×10^{-7}	0.258×10^{-6}	0.3439×10^{-6}
C	-0.855×10^{-7}	0.257×10^{-6}	0.3425×10^{-6}
D	-0.708×10^{-7}	0.212×10^{-6}	0.2828×10^{-6}
O	-0.119×10^{-7}	0.356×10^{-7}	0.475×10^{-7}

至于光学元件的应力变化可从图 10 中得到,由于温度的波动范围较小,光学元件的应力远小于其许用应力。光学元件平面内 AO 之间的转角可计算为

$$\alpha_{AO} = \frac{S_A - S_O}{l_{AO}}, \quad (1)$$

式中 S_A 为节点 A 的位移, S_O 为节点 O 的位移, l_{AO} 为 AO 之间的距离。

BO, CO, DO 之间的相对转角同样可以由(1)式得到。图 11 为所选节点之间的相对转角。

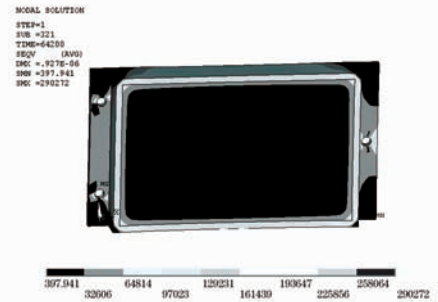


图 10 光学元件最大应力

Fig. 10 Maximal stress of optical element

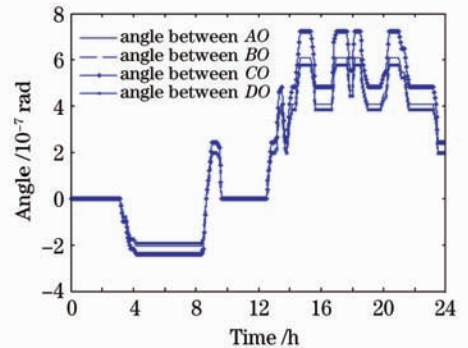


图 11 所选节点之间的相对转角

Fig. 11 Relative rotation angle between selected nodes

从图 11 可见 BO, CO 间的转角较 AO, DO 间的转角要大些。在 24 h 内镜面转角的变化范围达到 $1.12 \mu\text{rad}$ 。物理打靶对光学元件稳定性的要求,有两个时间段转角波动比较大,分别为 8:30~9:00 以及 13:00~15:00,转角波动最大分别为 $0.56 \mu\text{rad}$, $0.84 \mu\text{rad}$,已经超过了稳定性指标分配的要求,因此应尽量避免在这两个时间段内打靶,以提高打靶成功率,如果必须在这两个时间段内进行打靶,也应缩短光路准直之后打靶的等待时间,以减小温度在等待时间内的变化幅度。在其余的时间段内镜面变形波动都比较小,最大镜面变形为 $0.28 \mu\text{rad}$,可满足打靶实验要求。

4 结 论

采用温度传感器对编组站大口径光学元件环境

温度进行了24 h监测,监测结果表明在24 h内,温度最大波动范围为 $0.45\text{ }^{\circ}\text{C}$,工作期间温度变化范围为 $0.35\text{ }^{\circ}\text{C}$,并且上午温度波动较下午温度波动平稳,在8:30~9:00以及13:00~15:00这两个时间段内温度波动加剧。把温度传感器监测结果施加到建立的大口径光学元件有限元模型上,计算得到了光学元件在温度载荷作用下的变形,分析结果表明24 h内,镜面内转角的变化达到了 $1.12\text{ }\mu\text{rad}$,并且在8:30~9:00以及13:00~15:00转角波动最大分别为 $0.56\text{ }\mu\text{rad}$, $0.84\text{ }\mu\text{rad}$,已超过了稳定性指标分配对大口径光学元件稳定性的要求。光学元件镜面内转角变化小于 $0.28\text{ }\mu\text{rad}$,满足打靶要求。在8:30~9:00以及13:00~15:00进行打靶需认真考虑打靶时间,尽量缩短准直到打靶的时间,以减小温度变化对大口径光学元件的影响,以提高打靶成功率。在其他时间段内,由于目前温度传感器精度不够,造成温度变化曲线的陡变,以后需要采用更高精度的传感器,以更精确地测量温度的变化。

参 考 文 献

- David J. Trummer, Richard J. Foley, Gene S. Shaw. Stability of optical elements in the NIF target area building [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:363~371
- Stanley C. Sommer, Erlan S. Blis. Beam positioning [C]. *SPIE*, 1999, **3492**:112~135
- Chen Jianping, Shen Lincheng. Model and control technology for machining large-diameter optical aspheric mirror [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1705~1709
陈建平,沈林成. 大口径非球面镜加工建模与控制技术[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1705~1709
- Li Jindung, Guo Mingxiu, Fu Wenqiang *et al.*. Thermal distortion influence on single-slab heat capacity laser output [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(1):45~49
李劲东,郭明秀,复文强等. 热畸变对单板条热容激光器输出的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(1):45~49
- Qi Wenzong, Huang Wei, Zhang Bin *et al.*. Thermal distortion measurements and absorption analysis by finite element method of high power DF laser reflectors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(3):379~383
齐文宗,黄伟,张彬等. DF强激光反射镜热畸变的检测及热吸收的有限元分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3):379~383
- Huang Feng, Niu Yanxiong, Wang Yuefeng *et al.*. Calculation of thermal and mechanical effect induced by laser in optical window materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4):576~580
黄峰,牛燕雄,汪岳峰等. 光学窗口材料激光辐照热-力效应的解析计算研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4):576~580
- Feng Shulong, Zhang Xin, Weng Zhicheng *et al.*. Study on deformation of surface figure of large aperture mirror in temperature field [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(1):41~43
冯树龙,张新,翁志成等. 温度对大口径主镜面形变形的影响分析[J]. *光学技术*, 2005, **31**(1):41~43
- Zhang Junwei, Feng Bin, Zhou Yi *et al.*. Finite element analysis of the large aperture optical element ambient thermal stability [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(8):1295~1298
张军伟,冯斌,周忆等. 大口径光学元件环境热稳定性的有限元分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(8):1295~1298