

文章编号:1000-582X(2006)10-0074-04

大口径光学元件热稳定性初步分析*

冯斌¹,周忆²,张军伟²,张丽婷²,吴存学²

(1. 中国工程物理研究院 高温高密度等离子体物理国家重点实验室,四川 绵阳 621900;

2. 重庆大学机械工程学院,重庆 400044)

摘要:通过分析影响高功率固体激光装置中大口径光学元件稳定性的热激励源及其作用过程,指出日照瞬态温度、室内 HAVC(Air Conditioning) 系统以及局域瞬态热源是影响光学元件稳定性的主要因素;给出了大口径光学元件热影响的数学描述,并应用分析软件进行了初步计算. 分析结果表明,热激励对光学镜片的影响不是靠简单的热载荷的单一作用过程,而是通过流动和传热的相互耦合,以及中间过程的转换,最终对光学镜片产生作用. 因此,控制室内暖通空调系统的波动范围、减小镜箱内部温度变化、选用受热变形均匀和抗温度变形的镜片材料、减小温度引起的镜架热膨胀等是减小热激励影响的有效措施.

关键词:大口径光学元件;稳定性;热激励源;高功率固体激光装置

中图分类号:TG156

文献标识码:A

大口径光学元件的稳定性,对高功率固体激光装置中激光光束的传输质量和打靶精度起着至关重要的作用. 环境热激励是影响大口径光学元件工作稳定性的诸多因素之一. 大量事实表明,即使产生零点几度的温度变化也可能使光学元件的热变形达到微米级,而这将足以对大型光学系统的成像质量产生致命的影响^[1]. 因此,分析和确定影响光学元件的热激励源及其由于环境热激励产生的变形,为环境温度分布设计提供精度指标要求,是大口径光学元件的稳定性研究中需要重点解决的问题. 笔者就高功率固体激光装置系统中,大口径光学元件的环境热载荷激励源及其光学元件热变形的理论模型进行了分析,并用有限元方法进行了初步计算,提出了控制热变形的措施.

1 大口径光学元件环境热载荷分析

1.1 影响光学元件稳定性的热激励源

在高功率固体激光装置打靶过程中,凡是使光束偏离已准直位置的因素,都可归结为影响光学元件稳定性的激励因素,或者称为激励源. 而影响光学元件稳定性的热激励源主要来源于大厅和靶场的温度梯度. 温度梯度对光束漂移的影响主要表现在:(1)使光学元件支撑

结构系统发生变化而影响光束的指向性;(2)影响光束传媒介质的折射率,从而影响光束指向性^[2].

考虑到实际情况,引起大厅和靶场温度变化的热激励源主要有:外部环境热源、室内 HAVC(Air Conditioning) 系统以及局域瞬态热源.

(1) 外部环境热源:外部环境热源主要是昼夜温度变化,它是通过建筑物墙体传导,进而影响光学元件支撑结构系统的. 外部环境热源引起的外部环境温度变化是年气温变化和日气温变化两种周期函数的叠加. 年气温变化幅度大且周期长,长时间的影响可使室内设备构件的几何尺寸发生变化. 短期的影响主要是指日气温变化,它是以 24 h 为周期的时间函数,随季节和气候条件而有不同,可表示为^[1]:

$$T(t) = T_0 + A_0 \cos(\omega t), \quad (1)$$

式中, T 为温度; t 为时间; T_0 为平均温度, $\omega = \pi/12$, A_0 为日气温最大温差.

由于高功率固体激光装置建筑采用的是桁架式结构,靶场建筑与桁架相互独立,实际上外部环境气温变化对其影响是非常小的,因此可以只考虑日气温变化的影响.

(2) HVAC 系统:HVAC 系统是维持靶场、编组站

* 收稿日期:2006-03-22

基金项目:中国工程物理研究院国防预研基金资助项目(24073)

作者简介:冯斌(1976-),男,中国工程物理研究院,助理研究员,主要从事高功率固体激光技术研究.

和激光器大厅温度恒定的主要控制系统,由它所引起的温度起伏将会引起光学元件支撑结构的漂移,以及传媒介质折射率的变化.因此对系统空间内的光学系统而言,这是主要的变化热源.

(3)另外,光学支撑结构还可能受到来自于与支撑结构相接触的局部瞬态热源(如放大器散热过程、诊断设备和电动基架的冷却系统)的影响,而室内局部瞬态温度变化主要来源于真空机组的散热过程.这些热源将会产生热点,引起准直敏感元件的结构发生变化.

1.2 光学元件的热作用过程

由以上分析看出,当光学元件置于靶场系统的空间温度场中,受到热激励源影响时,环境中的热载荷是以三种边界条件(辐射、对流、热传导)的形式作用于光学系统的,并通过光学元件及其支撑系统的组成材料的热膨胀、温度变化和温度分布的不均匀,引起元件各部分的热变形,从而对光学系统的成像质量产生影响^[3-4].热载荷作用如图 1 所示,光学元件受热作用过

程描述如下:

(1)通过镜架组件的热传导:镜架组件处于靶场空间温度场中,其内部结构中存在温度差,温度的变化可以通过支架对光学元件产生热传导效应.

(2)通过镜箱组件的对流传热:箱壁由于空间温度场的作用将造成温度的不均衡,导致镜箱内部气体介质形成不均衡温度场.同时,镜箱内气体介质由于温度不均衡形成密度差而引起自然对流,以对流换热的形式作用于光学元件.虽然气体介质内部形成不均衡温度场的温度梯度可能较小,但由于光学元件直接处于其中,且由于室内温度场的变化周期短,变化速率较大,将使光学元件内产生较大的温差,导致应力和变形^[5].

(3)光学元件本身在传输激光时产生的热源:光学元件由于本身传输激光而发热,在元件内部形成不均匀温度场.同时发热的光学元件也成为镜箱的内部热源,与周围介质存在热传导及热辐射,也导致镜箱内气体介质形成不均衡温度场.

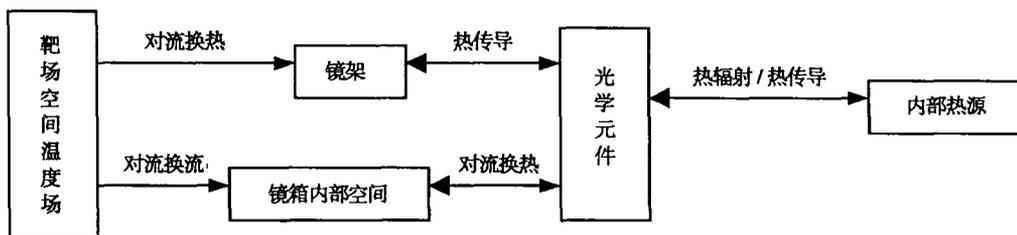


图 1 热载荷作用示意图

1.3 大口径光学元件热激励源作用数学模型

热载荷的作用使光学元件产生的应力和变形是由热弹性方程组决定的,可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \{\varepsilon'\} &= [B]\{U\} \\ \{\sigma'\} &= [D]\{\varepsilon\} \\ \{\varepsilon\} &= [\varepsilon']\{\varepsilon_0\} \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

式中, $\{U\}$ 为位移向量, $\{\varepsilon\}$ 为应变向量, $\{\varepsilon_0\}$ 为温升引起的初应变向量, $[B]$ 为几何矩阵, $[D]$ 为弹性矩阵, 分别表示为:

$$[B] = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{pmatrix}$$

$$[D] = \begin{pmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_2 \end{pmatrix},$$

$$D_1 = \begin{pmatrix} \zeta + 2G & \zeta & \zeta \\ \zeta & \zeta + 2G & \zeta \\ \zeta & \zeta & \zeta + 2G \end{pmatrix}, \quad (3)$$

$$D_2 = \begin{pmatrix} G & 0 & 0 \\ 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & G \end{pmatrix} = GI_{3 \times 3}.$$

式中, $\zeta = E\mu/(1 + \mu)(1 - 2\mu)$, $G = E/2(1 + \mu)$, E 是杨氏模量, G 为剪切弹性模量, μ 为泊松比. $I_{3 \times 3}$ 为三阶单位矩阵. 利用虚功原理可求得刚度矩阵为:

$$[K_\sigma^c] = \int_{V^c} [B]^T [D] [B] dV, \quad (4)$$

再根据载荷列向量 $\{F\}$ (包括已知的面力、体力和求得的热载荷) 和下列的位移场线性方程组, 求出位移向量:

$$[K_\sigma^c][U^c] = \{F\}, \quad (5)$$

式中, $\{U\}$ 为位移向量, $\{F\}$ 为载荷向量. 温升产生的等效节点载荷为:

$$\left. \begin{aligned} \{F\} &= \int_{V^c} [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dv \\ \{\varepsilon_0\} &= aT\{1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}^T \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

式中, α 为材料热膨胀系数.

上述方程即是在热激励作用下光学元件的应力、应变方程. 由(3) - (5)求解(2)式, 即可得到热载荷作用下光学元件的应力场和应变场.

2 热激励源作用的初步计算

根据上述热载荷作用数学模型, 采用 *IDEAS* 软件对镜片的热变形进行了初步分析, 建立有限元分析模型, 划分网格并添加约束后得到有限元模型如图 2 所示, 其中镜片单元为 15 098 个, 有 245 081 个节点; 镜框单元为 4 838 个, 有 7 419 个节点.

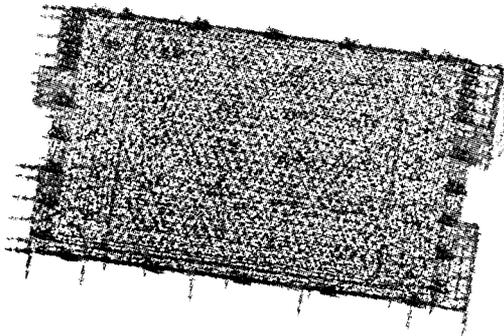


图 2 有限元分析模型

边界条件: 镜片固定在镜框内, 镜框四边固支.

材料的物理参数如表 1 所示.

表 1 镜片和镜框主要材料参数

材料	密度 $\rho/\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3}$	弹性模量 E/MPa	线膨胀系数 ($1/\text{K}$)
玻璃	2.2×10^{-6}	0.55×10^5	5.4×10^{-6}
铝合金	2.66×10^{-6}	0.7×10^5	2.3×10^{-5}

载荷条件: 实际测试靶场大厅温度变化的范围是 $22.1 \sim 23.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 一天之内温度变化值为 $0.5 \sim 1.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 根据上表数据取计算载荷为 $22 \sim 23.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围, 步距为 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 则有 9 个载荷值, 即 $22 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $22.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $22.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $22.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $22.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $23.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $23.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $23.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $23.6 \text{ }^\circ\text{C}$.

对由于温度瞬变引起光学元件热变形的计算作如下简化考虑: 由于镜片处于有气体介质的矩形镜箱中, 温度环境相对稳定, 因此, 在计算某一瞬时的镜片热变形时, 可直接对镜片施加某一温度载荷, 而得到镜片的变形.

经过计算, 对应不同的温度值, 得到镜片的最大位移如表 2 所示:

表 2 最大位移计算值

最大位移/mm	温度载荷								
	22°C	22.2°C	22.4°C	22.6°C	22.8°C	23°C	23.2°C	23.4°C	23.6°C
	1.46×10^{-4}	3.34×10^{-4}	5.34×10^{-4}	7.26×10^{-4}	9.22×10^{-3}	1.12×10^{-3}	1.32×10^{-3}	1.51×10^{-3}	1.71×10^{-3}

计算云图表明镜片最大位移是在镜框上, 而我们所关心的是镜片通光口径区域的变形, 为此, 取镜片对称中线上沿 y 轴的节点数 (取 20 个节点) 为横坐标, 在 x, y 方向的变形 (位移) 为纵坐标 (x, y 方向在镜片平面上, z 为垂直于镜片平面方向), 作上述温度载荷下的变形曲线如图 3、图 4 所示. 图中 9 条曲线分别对应计算用的 9 个温度载荷下的变形曲线.

分析图 3、4 可以看出, 对同一温度载荷, 镜片沿中轴线节点的变形在 x 轴方向变化不大, 而在 y 轴方向

上变化较大; 且温度较高时, 在 y 轴方向上变形变化较大 (曲线中间的突变是由于所取节点的不连续带来的).

由于计算时对边界条件和初始条件的简化, 上述计算的变形值只能进行定性的分析, 但可以看出, 镜片变形量的增加与温度变化成正比. 显然, 温度变化大, 则变形量的变化也大, 但其数值不大. 因此, 保持镜片环境温度的相对稳定, 是减小镜片变形的重要措施.

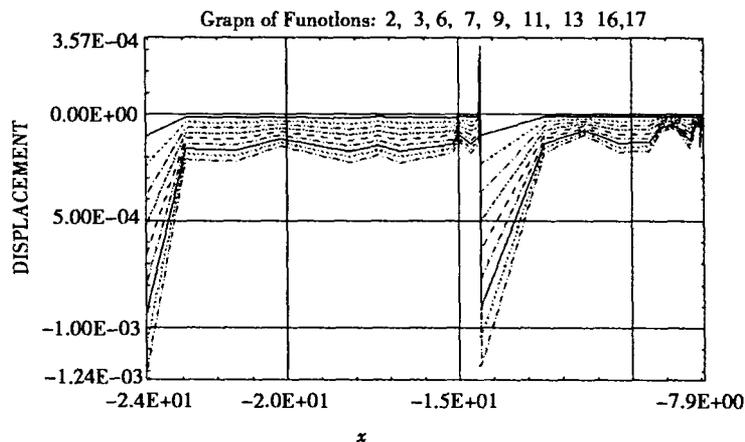


图 3 x 方向的变形与镜片中线上节点数的关系曲线

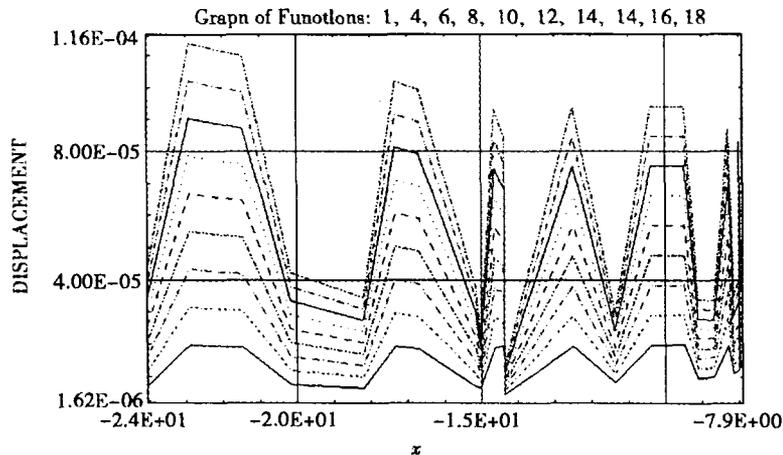


图4 y 方向的变形与镜片中线上节点数的关系曲线

3 结论

以上分析表明,热激励对光学镜片的作用不是简单的热载荷的单一作用结果,而是流动和传热的相互耦合作用,并通过中间过程的转换,最终对光学镜片产生影响.因此,控制室内暖通空调系统的波动范围、减小镜箱内部温度变化、选用受热变形均匀和抗温度变形的镜片材料、减小温度引起的镜架热膨胀是减小热激励影响的有效措施.

参考文献:

[1] 牛晓明,卢镔.空间光学仪器结构件的动态特性分析及

优化[J].光学精密工程,1995,3(6):99-106.

[2] 师智全,魏晓峰,马驰,等.大型固体激光器光束定位稳定性分析[J].强激光与粒子束,2000,12(s2):167-170.

[3] 郭晴,王汝笠,裴云天,等.衍射光学元件热稳定性的分析[J].光子学报,1999,28(5):463-466.

[4] BARKOS G, MITSOUIS E. Natural convection flow in a square cavity[J]. Int J Numerical Methods in Fluids, 1994, 18: 695-719.

[5] 丁延卫,尤政,卢镔.航天光学遥感器光机结构尺寸稳定性变化对成像质量的影响[J].光学与光电技术,2004,2(3):1-4.

[6] 贾力.高等传热学[M].北京:高等教育出版社,2003.3.

Preliminary Analysis of Thermal Influence on the Large Aperture Optical Elements

FENG Bin¹, ZHOU Yi², ZHANG Jun-wei², ZHANG Li-ting², WU Cun-xue²

(1. Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

(2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The thermal exciting resources which have influence on stability of the large aperture optical elements in high-power solid-state laser have been analyzed, and the mathematical descriptions of thermal influence on the large aperture optical elements have been gotten. Based on this understanding, some measures are proposed to minish the influence of those hermal exciting resources as a result of calculation of analysis program.

Key words: large aperture optical element stability; thermal exciting resource; high-power solid-state laser