

# 变形镜结构参数对高功率激光相位特性的影响

彭家琪 胡小川 陈丽霞 张 彬

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

**摘要** 在高功率连续激光辐照下,变形镜(DM)表面产生的热形变会对入射激光引入附加相位畸变,进而降低光束质量。利用有限元分析软件ANSYS建立了变形镜模型,分析比较了变形镜与高反镜热形变的特点,并讨论了变形镜结构参数对入射激光相位特性的影响。研究表明:与高反镜相比,变形镜的热形变更为明显;变形镜极头间距越小,热形变带来的高频相位畸变越多;极头长度对高频成分的影响较大,极头长度越短,热形变带来的高频成分越多,因而适当增加极头长度能够降低热形变带来的高频相位畸变;增大极头直径能使高频畸变所占比例有所降低,但会减弱变形镜的校正能力,因而在实际设计时应综合考虑。计算结果可为变形镜的参数优化设计提供一定参考价值。

**关键词** 激光光学; 变形镜; 热形变; 有限元分析; 结构参数; 相位畸变

**中图分类号** TN248; O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201535.0514001

## Effect of Structural Parameters of Deformable Mirrors on Phase Characteristics of High-Power Laser

Peng Jiaqi Hu Xiaochuan Chen Lixia Zhang Bin

*College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China*

**Abstract** The thermal distortion of the deformable mirror (DM) arised from the high-power continuous laser beam brings about the phase distortion and further degrades the beam quality. The model for the DM is built up using the finite element analysis software ANSYS. The characteristics of the thermal distortion of the DM and the reflective mirror are analyzed and compared. The influence of structural parameters of the DM on the incident light phase are also discussed. The results indicate that, the thermal distortion of the DM is more obvious compared with the high reflective mirror. The high frequency phase distortion introduced by thermal distortion increases with the decreasing of the spacing of heads. The length of heads exhibits a significant influence on the high frequency components and the high frequency phase distortion increases with the decreasing of the length of heads. As a result, high frequency phase distortion introduced by the thermal distortion can be diminished through increasing the length of heads appropriately. The proportion of the high frequency phase distortion decreases with the increasing of the diameter of heads, leading to the decreasing of correction capability. Consequently, the diameter of heads should be considered comprehensively in the practical application. The results obtained can provide valuable reference for the parameter optimization of the DM.

**Key words** laser optics; deformable mirror; thermal distortion; finite element analysis; structural parameter; phase distortion

**OCIS codes** 140.1550; 140.3460; 230.4040

收稿日期: 2014-12-15; 收到修改稿日期: 2014-12-31

基金项目: 中国科学院自适应光学重点实验室基金(LAOF201303)、四川省教育厅创新团队计划(13TD0048)

作者简介: 彭家琪(1990—),男,硕士研究生,主要从事变形镜热效应方面的研究。E-mail: 783028096@qq.com

导师简介: 张 彬(1969—),女,博士,教授,主要从事高功率激光技术、光束传输变换和控制、非线性光学等方面的研究。

E-mail: zhangbinff@sohu.com(通信联系人)

## 1 引 言

采用变形镜(DM)进行自适应波前校正的光束净化技术<sup>[1-6]</sup>是改善高功率激光器输出光束质量的有效手段之一,受到人们的广泛关注。然而已有研究表明,在强激光领域,高反膜系的微弱吸收仍是不可避免的<sup>[7]</sup>。随着激光功率的提高,膜系吸收的激光能量沉积会使镜面内部出现温度梯度分布,从而产生热形变<sup>[8-9]</sup>,而这种现象在自适应光学领域同样存在,在对高功率连续激光进行波前校正时,变形镜表面的热形变会对入射激光引入附加相位畸变,从而影响其校正能力。迄今为止,关于变形镜结构参数与其热形变的对应关系及其对入射光相位特性影响的研究却鲜有报道。本文利用有限元分析软件 ANSYS,建立了带极头的变形镜热分析模型,比较了变形镜热形变较普通高反镜的不同特点,并重点分析了变形镜结构参数对高功率连续激光相位特性的影响。

## 2 理论模型

### 2.1 变形镜的结构

变形镜通常由镜面、极头、驱动器以及基座4部分组成,其基本结构如图1所示。极头为镜面与驱动器间的连接单元,极头材料与镜面相同,驱动器通常为压电陶瓷,变形镜在工作时通过驱动器推动极头改变镜面形状以实现畸变波前的校正。本文以37单元变形镜为例进行建模仿真,变形镜镜面尺寸为 $\Phi 140\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ,极头尺寸为 $\Phi 8\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ,间距为20 mm。

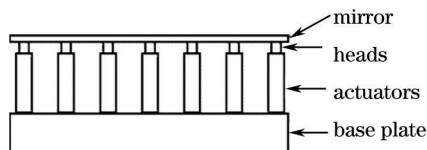


图1 变形镜的基本结构

Fig.1 Fundamental structure of DM

### 2.2 ZnSe/YbF<sub>3</sub>高反射膜系

本文以镀有ZnSe/YbF<sub>3</sub>多层高反膜系的连续表面分立驱动压电变形镜进行研究,假设高反膜系为 $\lambda/4$ 膜系:Sub/(LH)<sup>8</sup>/Air( $\lambda_0=3.8\text{ }\mu\text{m}$ ,Sub为Si,H为ZnSe,L为YbF<sub>3</sub>),表1给出了上述材料的热物理性能参数。针对中心波长 $\lambda_0=3.8\text{ }\mu\text{m}$ 的激光,考虑正入射的情况,利用膜系设计分析软件 Essential Macleod可计算得到单层ZnSe和YbF<sub>3</sub>膜层的厚度分别为392.56 nm和669.01 nm,高反膜系的整体反射率R为99.970%,透射率T为0.023%,吸收率A为0.0074%。

表1 膜与基底热物理特性参数

Table 1 Thermo-physical properties of the thin film and substrate

Material	Density / /( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Specific heat / [ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	Heat conductivity / [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ]	Thermal expansion coefficient / $\text{K}^{-1}$	Young's modulus /GPa	Poisson's ratio	Refractive index
ZnSe	5270	356	0.18	$7.57 \times 10^{-6}$	67.2	0.28	$2.42-1.5 \times 10^{-5}i$
YbF <sub>3</sub>	8150	361	0.051	$1.89 \times 10^{-5}$	75.79	0.28	$1.42-3.0 \times 10^{-5}i$
Si	2329	733	173.6	$4.15 \times 10^{-6}$	130.91	0.266	$3.44-2.4 \times 10^{-8}i$

### 2.3 有限元模型

由于驱动器和基座没有与镜面直接接触,对镜面的影响很小,因而在计算中将其忽略,仅考虑镜面和极头的热形变。在ANSYS中,按照表1所给参数建立材料模型,从坐标原点开始,沿z轴负方向依次建立高反射膜系、镜面以及极头。在进行温度场分析时,采用SOLID70单元进行网格划分。由于镜面与膜层厚度相差3个数量级,为减小计算误差,在膜层与镜面接触的位置将镜面沿厚度方向划分多层网格,保证该位置处的网格厚度与膜层厚度在同一量级。对于每一层薄膜,由于其厚度极薄,因而在轴向只划分一层网格。膜层、基底以及极头之间采用布尔代数粘贴在一起,实质是默认彼此间接触热阻为零,可以充分传热。图2给出了网格划分之后的变形镜有限元模型。

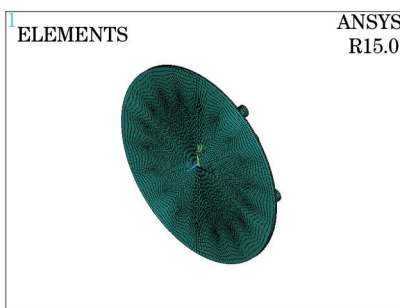


图2 变形镜有限元模型

Fig.2 Finite element model of DM

### 3 热形变分析

变形镜作为波前校正元件,需要对畸变波前进行实时补偿。然而,在强激光辐照下,热形变的存在会导致其实际拟合面形与预期拟合面形存在一定偏差,进而会影响其校正效果,制约了变形镜的校正能力。为此,本文首先对变形镜的热变形及其特点进行了分析。

#### 3.1 变形镜的热形变

假设入射激光为圆形平顶光束,相应的光强分布为

$$I(x,y) = I' \exp\left\{-\left[\frac{(x^2 + y^2)^{1/2}}{w_0}\right]^n\right\}, \quad (1)$$

式中  $w_0$  为光束半径,  $n$  为光束阶数,  $I'$  为入射光功率密度。

假设光斑半径  $w_0=40$  mm, 光束阶数  $n=20$ , 入射光波长  $\lambda_0=3.8$   $\mu\text{m}$ , 沿  $z$  轴负方向连续入射, 持续时间为 30 s, 高反膜系的净吸收功率  $P=25.9$  W, 环境温度为 20  $^{\circ}\text{C}$ 。假设变形镜的形变对温度场的影响可以忽略, 可按照先计算温度场再计算热形变场的顺序进行分析。

图 3 给出了激光连续辐照 30 s 后, 镜面的温度分布和热形变分布。圆形平顶光束辐照下, 变形镜表面的最高温升为 10.42  $^{\circ}\text{C}$ , 热形变面形峰谷(PV)值为 1.262  $\mu\text{m}$ 。

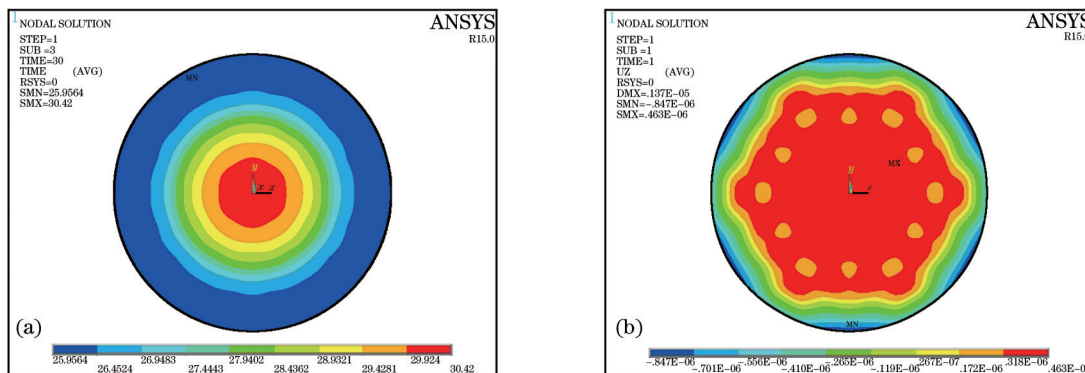


图3 变形镜温度分布和热形变分布。(a)温度分布;(b)热形变分布

Fig.3 Temperature distribution and thermal distortion distribution of DM.

(a) Temperature distribution; (b) thermal distortion distribution

分析图 3 可知, 变形镜表面温度分布和热形变分布与入射光束形状密切相关, 变形镜表面的高温区域主要集中在光束辐照区域, 热形变分布不仅与入射光束形状有关, 还与变形镜的极头存在一定的关系。

#### 3.2 变形镜与高反镜的比较

根据 3.1 节变形镜模型, 进一步建立尺寸为  $\Phi 140$  mm $\times$ 5 mm 的高反镜模型, 在其余参数不变的条件下, 图 4 比较了圆形平顶光束辐照下, 变形镜和高反镜沿  $x$  轴径向的温度分布和热形变分布。表 2 则列出了圆形平顶光束辐照下, 变形镜和高反镜的典型数据。

分析图 4(a) 可知, 变形镜和高反镜的温度场分布形状相似, 但变形镜的温度梯度更大。从图 4(b) 可以看出, 变形镜的热形变分布起伏较大, 而高反镜的热形变分布则较为光滑。这是因为与高反镜相比, 变形镜的

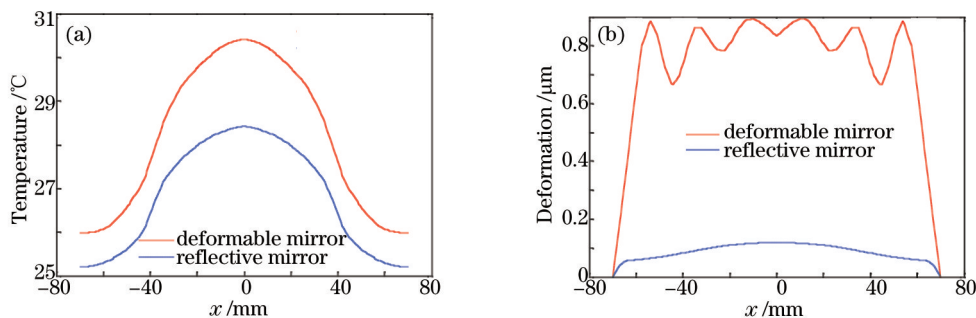


图4 变形镜和高反镜沿x轴径向的温度分布和热形变分布比较。(a)温度分布;(b)热形变分布

Fig. 4 Comparison of temperature distribution and thermal distortion distribution of DM and reflective mirror along x-axis.

(a) Temperature distribution; (b) thermal distortion distribution

表2 变形镜和高反镜的比较

Table 2 Comparison of DM and reflective mirror

	Temperature	Thermal distortion	
	rise /°C	PV /μm	RMS /μm
DM	4.46	1.262	0.373
Reflective mirror	3.23	0.122	0.135

厚度更薄,因而在入射激光功率密度相同的情况下,变形镜单位体积内堆积的热量要高于普通高反镜单位体积内堆积的热量,致使其热形变面形的PV值更大,在表2中表现为在相同光束入射下,变形镜热形变面形的PV值更大。此外,由于变形镜背部有极头支撑,致使其表面的热变形分布更加复杂,在表2中表现为在相同光束入射下,变形镜热形变面形的均方根(RMS)值更大。

### 3.3 热形变对入射光相位特性的影响

变形镜热变形的存在将对入射光束带来附加的相位调制。假设入射光振幅为  $E_0(x,y)$ , 初始相位为  $\varphi_0(x,y)$ , 经变形镜反射后的光束振幅  $E_1(x,y)$  可表示为

$$E_1(x,y) = E_0(x,y) \exp\{i[\varphi_0(x,y) - \varphi(x,y)]\}, \quad (2)$$

式中  $\varphi(x,y)$  为变形镜热形变引起的光束相位变化。由于变形镜的尺寸远小于其曲率半径,热形变产生的相移可以认为是变形镜反射表面沿z轴方向(镜面厚度)的变形引起的<sup>[10]</sup>, 以  $k$  表示波数, 则附加相移分布为

$$\varphi(x,y) = k \times 2z(x,y). \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式可得到经变形镜反射后的光场振幅为

$$E_1(x,y) = E_0(x,y) \exp[-ik \times 2z(x,y)], \quad (4)$$

式中  $z(x,y)$  为变形镜的热形变面形。

为了更好地反映热形变对入射波前带来的相位畸变,可借助波前功率谱密度(PSD,  $D_{ps}$ )来进行定量分析。离散计算时,PSD的表达式为<sup>[11]</sup>

$$D_{ps}(f_m) = \frac{\Delta x}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} z(n) \exp(-i2\pi f_m n \Delta x) \right|^2, \quad (5)$$

式中  $f_m$  为空间频率  $\Delta x$  为采样间距,  $N$  为采样点数,  $z$  为相位分布,  $-N/2 \leq m \leq N/2$ 。

由(4)式和(5)式可以计算热形变对入射波前引起的相位畸变,图5比较了经变形镜和高反镜反射后,1.2倍光斑范围内畸变波前的PSD分布。

由图5可以看出,在入射激光功率相同的情况下,变形镜热形变引起的相位畸变的PSD分布远高于高反镜。以截止频率  $\Delta\nu = 0.033 \text{ mm}^{-1}$  为例,将高于  $\Delta\nu$  的部分划分为高频,经计算,圆形平顶光束入射时,变形镜热形变所引起的相位畸变中,高频所占比例为8.10%,而高反镜热形变所引起的高频畸变所占比例仅为0.06%。由此可见,与高反镜相比,变形镜的热形变更不可忽略,特别是会给人射光束带来中高频相位畸变,因而有必要详细研究变形镜的结构参数对高功率激光束相位特性的影响。

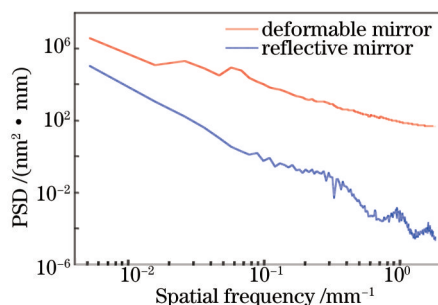


图5 经变形镜和高反镜反射后畸变波前PSD比较

Fig.5 Comparison of PSD of distorted wavefront reflected by DM and reflective mirror

## 4 变形镜结构参数的分析

### 4.1 极头的排布方式

一般来说,变形镜极头有三种常见的排布方式:圆形排布、三角形排布和正方形排布<sup>[12]</sup>,分别如图6所示。

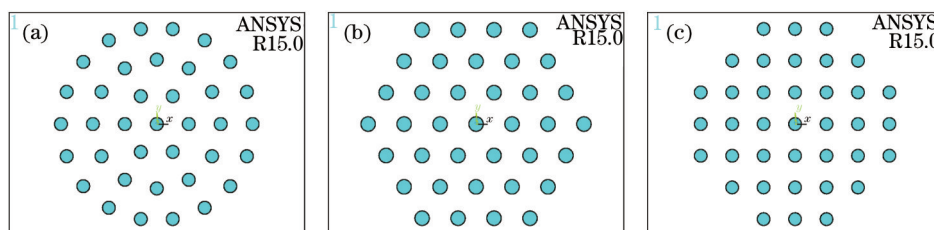


图6 变形镜常见极头排布方式。(a)圆形排布;(b)三角形排布;(c)正方形排布

Fig.6 Common arrangement mode of heads of DM.

(a) Circular arrangement; (b) triangular arrangement; (c) rectangular arrangement

为便于分析比较,本文假设图6中三种变形镜模型均为37单元变形镜,极头间距为20 mm。表3比较了圆形平顶光束辐照下,变形镜热形变所引起的畸变波前PV值和RMS值。

表3 畸变波前的PV值和RMS值

Table 3 PV value and RMS value of distorted wavefront

Arrangement mode	Circular	Triangular	Rectangular
PV / $\mu\text{m}$	0.551	0.469	0.636
RMS/ $\mu\text{m}$	0.354	0.308	0.418

分析表3可知,在三种变形镜常见极头排布方式中,三角形排布方式变形镜热形变所引起的畸变波前PV值和RMS值最小,正方形排布方式时的畸变波前PV值和RMS值最大,而圆形排布方式则居于二者之间。因此,在本文后续仿真分析中均采用三角形排布方式。

### 4.2 极头的间距

极头的间距会影响极头的密度,进而影响变形镜的校正能力。为了研究极头间距对高功率激光束相位特性的影响,分别建立19单元和37单元的变形镜模型,极头间距分别为25 mm和20 mm,对应的极头排布方式如图7所示。图8给出了经变形镜反射后,畸变波前的PSD分布。

由图8可知,极头间距对畸变波前的PSD分布存在明显影响,极头间距越大,畸变波前的低频成分越多,高频成分越少。极头间距为20 mm时,畸变波前高频成分所占比例为8.10%,而极头间距为25 mm时,畸变波前高频部分所占比例仅为1.39%。这是因为较小的极头间距对应较多的极头数目,而极头数目越多,对镜面沉积热量的换热就越充分,因而镜面的温度梯度就越小,热形变也就越小。然而,极头又会对镜面造成一定的约束作用,进而增加变形镜表面的起伏,产生更多的高频畸变,而高频畸变又难以通过变形镜自身进行校正。由此可见,在对变形镜校正能力要求并不高时,使用极头间距更小的变形镜反而会引入难以消除的高频畸变,从而不利于达到理想的光束净化目的。



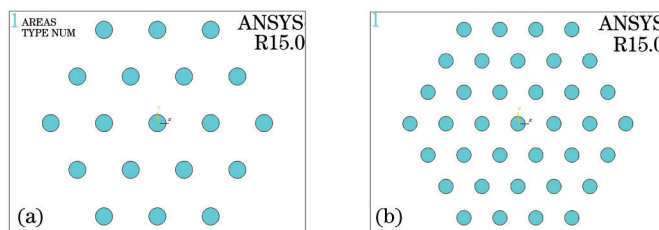


图7 不同间距的极头排布方式。(a)间距为 25 mm;(b)间距为 20 mm

Fig.7 Arrangement mode of heads with different spacings. (a) Spacing of 25 mm; (b) spacing of 20 mm

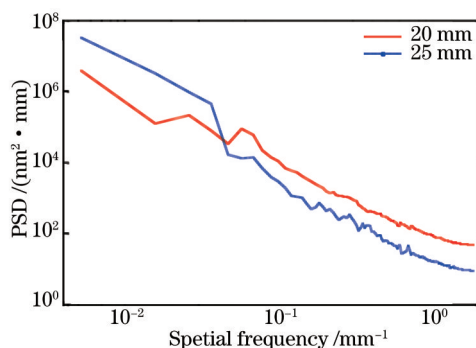


图8 不同极头间距下畸变波前的 PSD 分布

Fig.8 PSD distribution of distorted wavefront with different spacings

### 4.3 极头的长度

极头是连接变形镜镜面和促动器的关键部分,极头的长度会影响变形镜的热传导,进而影响变形镜的热形变。以 37 单元变形镜为例,建立极头长度分别为 10、20、30 mm 的变形镜模型,其余参数不变。图 9 比较了不同极头长度下镜面  $x$  轴径向的热形变分布和畸变波前 PSD 分布。

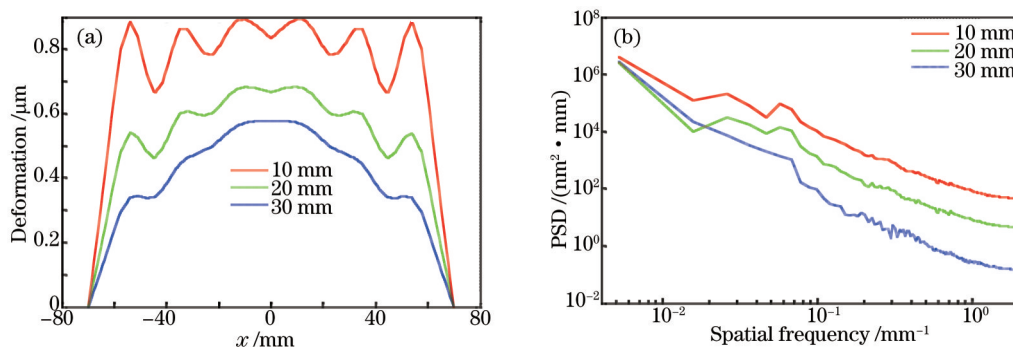


图9 不同极头长度的比较。(a)  $x$  轴径向的热形变分布;(b)畸变波前的 PSD 分布

Fig.9 Comparison with different lengths of head. (a) Thermal distortion distribution along  $x$ -axis;

(b) PSD distribution of distorted wavefront

从图 9(a)可以看出,随着极头长度的增加,沿  $x$  轴径向镜面的热形变分布曲线逐渐变得“光滑”。分析其原因可知,镜面沉积的热量可以向极头传导,在相同时间内,极头长度越长,由镜面传入极头的热量就越多。并且,随着极头长度的增加,极头沿轴向的刚度逐渐减小,从而致使径向热形变分布逐渐变得“光滑”。

从图 9(b)可以看出,随着极头长度的增加,畸变波前中高频成分逐渐减少。当极头长度达到 30 mm 时,畸变波前中高频所占比例仅为 0.31%,已接近高反镜热形变所带来的高频畸变。这是因为极头长度较短时,变形镜表面产生的热量更多地沉积在变形镜内部,而当极头长度较长时,在变形镜表面产生的热量可通过更长的极头向后传导,从而降低了变形镜自身的温度。并且,较长的极头轴向刚度较小,导致其径向热形变分布曲线更加“光滑”,因而对应的畸变波前中高频成分更少。

由于变形镜对畸变波前的校正作用可等价于一个高通滤波过程<sup>[13]</sup>,变形镜能够对低于特定空间频率的畸变波前进行校正,而对于高于该空间频率的畸变波前则起不到校正作用。因此,在设计变形镜的极头参

数时,应尽可能少地引入高频成分。由上述分析可知,随着极头长度的增加,变形镜自身热形变引入的高频成分减少,因而在实际工作中可适当增加极头的长度。

#### 4.4 极头的直径

极头的直径决定了极头与镜面的接触面积,从而影响变形镜的热传导和热形变。同样以 37 单元变形镜为例,分别计算了极头直径为 6、8、10 mm 时变形镜的热形变。图 10 比较了不同极头直径下镜面  $x$  轴径向的热形变分布和畸变波前 PSD 分布。

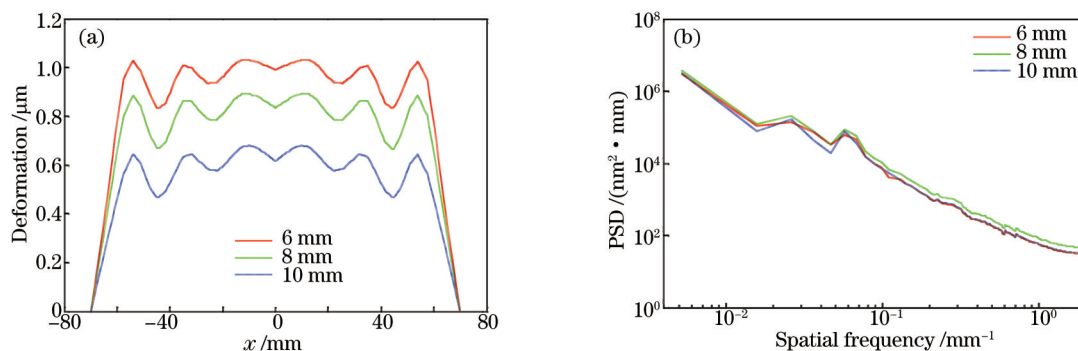


图 10 不同极头直径的比较。(a)  $x$  轴径向的热形变分布;(b)畸变波前的 PSD 分布

Fig. 10 Comparison with different diameters of head. (a) Thermal distortion distribution along  $x$ -axis;

(b) PSD distribution of distorted wavefront

从图 10(a)可以看出,变形镜热形变分布的形状较为相似,但其起伏程度存在一定的差异,且随着极头直径的增加,热形变面形的 PV 值逐渐减小。分析图 10(b)可知,不同极头直径的变形镜的 PSD 曲线形状基本相似。经计算,当极头直径为 6 mm 时,畸变波前高频所占比例为 8.37%,极头直径为 8 mm 时,高频所占比例为 8.10%,当极头直径为 10 mm 时,畸变波前高频所占比例为 6.86%,表明适当增大极头直径能在一定程度上降低变形镜热形变带来的影响。然而,极头直径的改变会影响极头对镜面的施力作用,进而会影响单个驱动器对镜面带来的影响。通常情况下,变形镜的影响函数可表示为<sup>[14]</sup>

$$I_i(x, y) = \exp \left[ \ln b \cdot \frac{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}{d^2} \right], i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (6)$$

式中  $d$  为驱动器间距,  $b$  为交连值,与镜面刚度、驱动器刚度及驱动器配置形状有关<sup>[15]</sup>,  $(x_i, y_i)$  为驱动器  $i$  的位置坐标。

通过计算单个极头驱动对镜面形状的影响,可间接拟合得到变形镜的交连值  $b$ 。经计算,单个极头归一化后的影响函数曲线如图 11 所示。

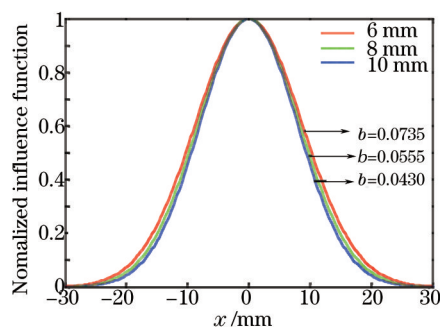


图 11 归一化后中心极头的影响函数

Fig. 11 Normalized influence function of central head

由图 11 可知,随着极头直径的增大,变形镜的交连值随之减小,表明相邻极头间的影响随极头直径的增大而减小。由已有文献可知,交连值越大,变形镜的校正能力越好,因而在设计极头直径时应进行综合考虑。

## 5 结 论

利用有限元分析软件 ANSYS 建立了镀有高反射膜系的变形镜的热形变分析模型,比较了高功率激光辐

照下变形镜和高反镜的温度场和热形变,重点分析了变形镜的结构参数对高功率激光相位特性的影响。研究表明:在相同的激光辐照下,变形镜的温升和热形变均高于普通高反镜,其热形变还会对入射激光引入附加高频相位畸变。变形镜结构参数的不同将对入射激光相位特性产生不同的影响。通过比较可知。极头采用三角形排布方式的变形镜对激光畸变波前的影响较小,而正方形排布方式的影响最大;采用三角形排布时,极头间距越大,热形变引入的低频相位畸变成分越多,极头间距越小,则引入的高频相位畸变越多;在极头间距不变的情况下,极头长度越长,热形变面形越光滑,相应的高频相位畸变越少,因而适当选择较长的极头有利于减小变形镜热形变带来的影响;增大极头直径能在一定程度上降低畸变波前中高频成分所占比例,但会减小交连值,降低变形镜的校正能力,因而在设计时应综合进行考虑。

## 参 考 文 献

- 1 Guo Guangyan, Fan Zhongwei, Yu Jin, *et al.*. Solid-state laser distortion wavefront adaptive correction technology and its research progress[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 030001.  
郭广妍,樊仲维,余锦,等. 固体激光器波前畸变自适应校正技术及研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 030001.
- 2 Guo Ailin, Zhu Haidong, Yang Zeping, *et al.*. Deformable mirror control algorithm based on the phase correction at the actuator position[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0311001.  
郭爱林,朱海东,杨泽平,等. 基于驱动器位置相位校正的变形镜控制算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0311001.
- 3 Liu Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, *et al.*. Progress of the continuous surface deformable mirror based on piezo-ceramic actuator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 090003.  
林旭东,刘欣悦,王建立,等. 基于压电陶瓷促动器的连续镜面变形镜研制进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 090003.
- 4 Chen Xindong. Testing of a 9-points deformable mirror and its application in space camera system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1023001.  
陈新东. 9点促动变形镜性能测试及在空间相机中的应用研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1023001.
- 5 Liu Xudong, Liu Xinyue, Wang Jianli, *et al.*. Development and performance test of the 961-element deformable mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0601001.  
林旭东,刘欣悦,王建立,等. 961单元变形镜研制及性能测试[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0601001.
- 6 Wang Sanhong, Liang Yonghui, Long Xuejun, *et al.*. Experimental research of laser beam cleanup for dynamic aberrations based on stochastic parallel-gradient-descent method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 97-101.  
王三宏,梁永辉,龙学军,等. 基于随机并行梯度下降方法的动态光束净化实验研究[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 97-101.
- 7 Yang Fu, Huang Wei, Zhang Bin, *et al.*. Measurement of weak absorption of thin film coatings irradiated by 10.6  $\mu\text{m}$  laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(3): 277-280.  
杨富,黄伟,张彬,等. 10.6  $\mu\text{m}$ 激光辐照下光学薄膜的微弱吸收测量[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(3): 277-280.
- 8 Wu Shuang, He Yehuan, Zhang Bin. Analysis of thermal distortion of resonator mirror with high reflective coatings in different clamping ways[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(2): 021402.  
吴双,贺也洹,张彬. 不同夹持方式下不同高反膜系腔镜的热形变分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(2): 021402.
- 9 Zhou Qiong, Jiang Zongfu, Xi Fengjie. Study of thermal deformations induced optical aberrations for  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mirror in an optical system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1002001.  
周琼,姜宗福,刁锋杰. 光学系统中白宝石分光镜的热变形像差分析[J]. *中国激光*, 2013, 39(10): 1002001.
- 10 Du Yanyi, An Jianzhu, Shu Xiaojian. Effect of thermal distortion of mirror on characteristics of laser beam in unstable resonator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(8): 1333-1338.  
杜燕贻,安建祝,束小建. 腔镜热变形对非稳腔光场特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(8): 1333-1338.
- 11 Zhang Rongzhu, Cai Bangwei, Yang Chunlin, *et al.*. Numerical method of the power spectral density[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(6): 661-664.  
张蓉竹,蔡邦维,杨春林,等. 功率谱密度的数值计算方法[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(6): 661-664.
- 12 Zeng Zhige, Ling Ning, Rao Xuejun. Analysis for the finite element of the active thin mirror surface[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1995, 22(2): 8-19.



- 曾志革, 凌 宁, 饶学军. 能动薄镜面的有限元分析[J]. 光电工程, 1995, 22(2): 8-19.
- 13 R E Wagner. Imagery Utilizing Multiple Focal Planes[D]. America: University of Arizona, 1976.
- 14 Ma Xuemei, Han Kai, Zhang Bin. Prediction for wavefront correction effect of discrete deformable mirror based on filter function[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101002.
- 马雪梅, 韩 开, 张 彬. 基于滤波函数的分立变形镜波前校正效果预估[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101002.
- 15 Zhou Renzhong. Adaptive Optics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996: 252-257.
- 周仁忠. 自适应光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 252-257.

栏目编辑: 史 敏