

# 变形镜热形变及其对光束质量的影响分析

胡小川 彭家琪 张 彬

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

**摘要** 在考虑中红外高反膜系的非均匀吸收情况下,利用ANSYS有限元分析软件,建立了带高反膜系的变形镜模型。定量分析了连续激光辐照下,变形镜的温升、热形变及其对光束质量的影响。研究表明,在使用有限元软件进行分析时,高反膜系的非均匀吸收不可忽略;变形镜极头间距越窄,热形变带来的波前畸变空间频率越高;当入射波前峰谷(PV)值与变形镜热形变面形PV值相差不大时,热形变带来的影响最明显;在总吸收能量一定的情况下,入射激光功率越大,热形变对光束质量的影响越明显。此外,针对不同的换热条件,讨论了变形镜热形变对光束质量的影响,进而针对热形变的产生机理,提出采用局部换热方式降低变形镜的热形变。

**关键词** 激光器;局部换热;有限元法;变形镜;热形变

**中图分类号** TN248; O439 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201542.0102003

## Thermal Distortion of Deformable Mirror and Its Influence on Beam Quality

Hu Xiaochuan Peng Jiaqi Zhang Bin

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

**Abstract** Considering the non-uniform absorption of mid-infrared film with high reflectivity, the model for the deformable mirror (DM) with high reflectivity films is built up using the finite element analysis software ANSYS. The temperature rise and thermal distortion of the DM radiated by the continuous laser beam are calculated, and their effects on beam quality are analyzed quantitatively. The results indicate that the non-uniform absorption of the high reflectivity film should not be neglected by using finite element analysis software. The narrower the heads spacing are, the higher the spatial frequency caused by the thermal distortions is. The effect is most obvious for the case of the incident laser beam with the peak-to-valley (PV) value of the wave distortion similar to that of the thermal distortion. For the given total absorption energy, the higher the incident laser power is, the more obvious the effect on beam quality caused by the thermal distortion is. In addition, according to different heat transfer conditions, the effect of the thermal distortion of the DM on beam quality is also discussed, and the local heat transfer mode is proposed according to the mechanism of the thermal distortion.

**Key words** lasers; local heat transfer; finite element method; deformable mirror; thermal distortions

**OCIS codes** 140.1550; 140.3460; 230.4040

## 1 引言

在高功率激光系统中,由于强激光的持续辐照,光学元件内部将形成温度梯度分布,进而产生热形变,从而对光束质量造成影响<sup>[1-3]</sup>。与普通反射镜相比,变形镜的厚度更薄、结构更复杂,致使其在激光连续辐照

收稿日期: 2014-08-04; 收到修改稿日期: 2014-08-15

基金项目: 中国科学院自适应光学重点实验室基金项目(LAOF201303)、四川省教育厅创新团队计划资助(13Td0048)

作者简介: 胡小川(1990—),男,硕士研究生,主要从事变形镜热效应方面的研究。E-mail: hu\_xiaochuan@sina.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)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 [www.opticsjournal.net](http://www.opticsjournal.net)

下所产生的热形变面形更为复杂,对光束质量的影响也更明显。作为位相校正元件,变形镜需要对入射畸变波前进行实时补偿,以改善光束质量<sup>[4]</sup>。然而,热形变的存在将使变形镜在对畸变波前进行校正时引入新的畸变,从而制约了光束质量的提高。本文利用 ANSYS 有限元分析软件,建立了考虑高反射膜系非均匀吸收的变形镜热形变分析模型,定量分析了变形镜热形变及其对光束质量的影响。此外,还针对不同的换热方式进行比较分析,为变形镜的应用奠定了理论基础。

## 2 计算模型

在强激光辐照下,薄膜元件对激光能量的吸收主要来自于靠近空气的几个膜层,产生的热量经热传递后被基底吸收。本文考虑高反射膜系内部的非均匀吸收,建立了镀有高反射膜系的变形镜有限元分析模型。通常情况下,变形镜的厚度薄于普通高反镜,因此,在相同功率的激光辐照下,变形镜单位体积内吸收的能量更多,并且,由于极头的影响,变形镜将产生更为复杂的热形变面形。

### 2.1 变形镜结构

以 61 单元变形镜为例进行研究,变形镜结构如图 1(a)所示,镜面包括膜系和基底,镜面后方依次为极头、驱动器以及基座。其中,极头为镜面与驱动器间的连接单元,其材料与镜面相同;驱动器是控制变形镜面形的主要元件,其材料为压电陶瓷。通常情况下,极头以正三角形方式进行排列,该排列方式中极头对镜面作用力较为均匀,极头间相互影响也较为相似<sup>[5]</sup>。因此,文中讨论的变形镜极头也采用正三角形排列。图 1(b)为该 61 单元变形镜极头分布示意图,极头间距为 20 mm,直径为 8 mm,长度为 10 mm,镜面直径为 170 mm,厚度为 3 mm。

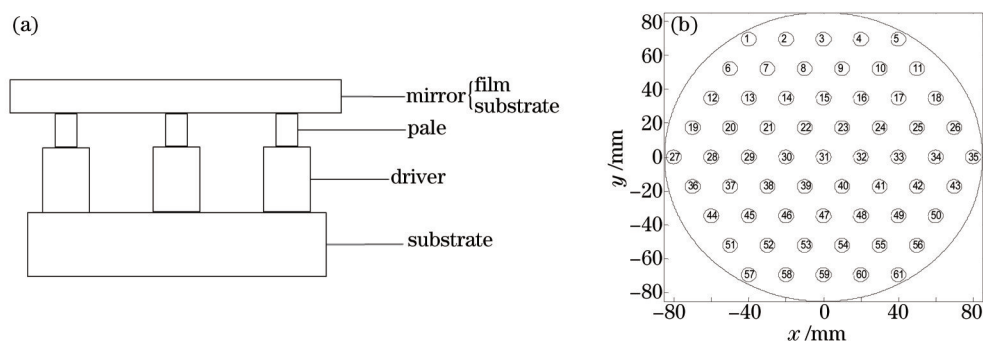


图 1 变形镜模型图。(a) 变形镜结构;(b) 极头分布示意图

Fig.1 Model of deformable mirror. (a) Structure of deformable mirror; (b) distributing frame of drivers

### 2.2 高反射膜系

针对  $\lambda_0 = 3.8 \mu\text{m}$  波长的入射激光,考虑激光正入射的情况,高反膜系设计为  $\text{Sub}/(\text{HL})^{11}\text{H}/\text{Air}$  ( $\lambda_0 = 3.8 \mu\text{m}$ , Sub 为 Si, H 为 ZnS, L 为  $\text{YbF}_3$ ),相关材料参数如表 1 所示。

表 1 膜与基底热物理性质参数

Table 1 Thermo-physical properties of films and substrates

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 / $\text{K}^{-1}$	Young's modulus /GPa	Poisson ratio	Refractive index
ZnS	4080	1927	0.19	$7.10\times 10^{-6}$	74.5	0.29	$2.20-i2.25\times 10^{-5}$
$\text{YbF}_3$	8150	361	0.051	$1.89\times 10^{-5}$	75.79	0.28	$1.40-i3.00\times 10^{-5}$
Si	2329	733	173.6	$4.15\times 10^{-6}$	130.91	0.266	$3.44-i2.40\times 10^{-8}$

运用 Macleod 膜系设计软件分析,得到该膜系中单层 ZnS 薄膜的厚度为 431.82 nm,单层  $\text{YbF}_3$  薄膜的厚度为 678.57 nm,膜系反射率  $R$  为 99.97544%,透过率  $T$  为 0.01365%,吸收率  $A$  为 0.01091%。基底材料为单晶硅,对红外光的透过率良好,即不考虑基底对入射光的吸收。

### 2.3 热源模型

利用 Macleod 膜系设计软件, 计算得到每一层膜的吸收率如图 2 所示, 横坐标表示膜层序数, 与空气接触的膜层序数为 1, 与基底接触的膜层序数为 23, 纵坐标表示该膜层吸收能量占总入射能量的百分比。

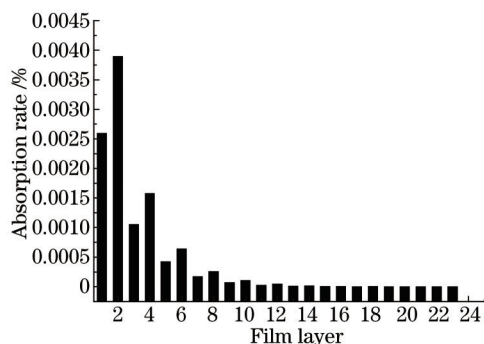


图 2 每层膜的吸收率

Fig.2 Absorption rate of each layer

从图 2 中可以看出, 靠近空气的几个膜层吸收了绝大部分的入射激光能量, 且相邻膜层间,  $\text{YbF}_3$  吸收的能量更多。

假设入射激光为圆形平顶光束, 相应的光强分布为

$$I(x, y) = I' \exp\left\{-\left[\frac{(x^2 + y^2)^{1/2}}{w_0}\right]^{20}\right\}, \quad (1)$$

式中  $w_0$  为光束半径,  $I'$  为入射光功率密度。若固定吸收功率  $P$ , 则有  $I' = P/(AS)$ ,  $A$  为膜系吸收率,  $S$  为环形光束辐照面积。

在 ANSYS 有限元分析软件中, 可根据每层膜的吸收系数来建立相应的热源, 以等效热源的方式模拟材料对激光能量的吸收。膜层中任一位置处单位时间、单位体积内激光沉积的能量即为膜系所吸收的能量, 据此可针对每一个膜层建立相应的热源, 即

$$Q_n(x, y) = \frac{d[I(x, y)A_n]}{dz}, \quad (2)$$

式中  $I(x, y)$  为入射光的光强分布,  $A_n$  为每一层膜的吸收率,  $Q_n$  为每一层膜吸收的能量。

### 3 热形变分析

根据图 1 所示的 61 单元变形镜结构, 建立有限元模型如图 3 所示。由于驱动器和基座没有直接与镜面接触, 对镜面的影响可以忽略, 因而在分析中仅考虑镜面和极头的热形变。

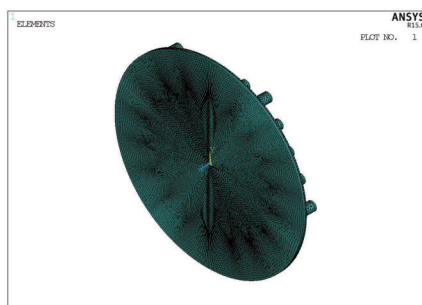


图 3 变形镜有限元模型

Fig.3 Finite element model of deformable mirror

在网格划分时, 对于每一层薄膜, 轴向只划分一层网格。膜层、镜面以及极头之间, 均采用布尔代数粘在一起, 实质是默认彼此间接触热阻为零, 可以充分传热。由于镜面与膜层厚度相差 3 个数量级, 为减小计算误差, 在镜面与膜层接触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。

### 3.1 温度场分布

假设激光连续辐照 30 s, 光斑半径为 45 mm, 环境温度为 20 °C, 高反膜系的净吸收功率  $P=34.7$  W, 变形镜后端面与空气有热交换, 其热交换系数取  $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。在变形镜温度变化不大的情况下, 变形镜热形变对温度场的影响可以忽略, 因此, 可采用热-结构的间接耦合方式进行分析。

图 4 给出了激光辐照 30 s 后, 变形镜的温度分布。图 4(a) 为变形镜前表面温度分布, 图 4(b) 为后表面温度分布, 图 4(c) 为轴向温度分布。变形镜前表面最高温升为 10.94 °C, 膜层与基底接触面的最高温升为 10.08 °C, 后表面(不含极头)的最高温升为 9.98 °C。

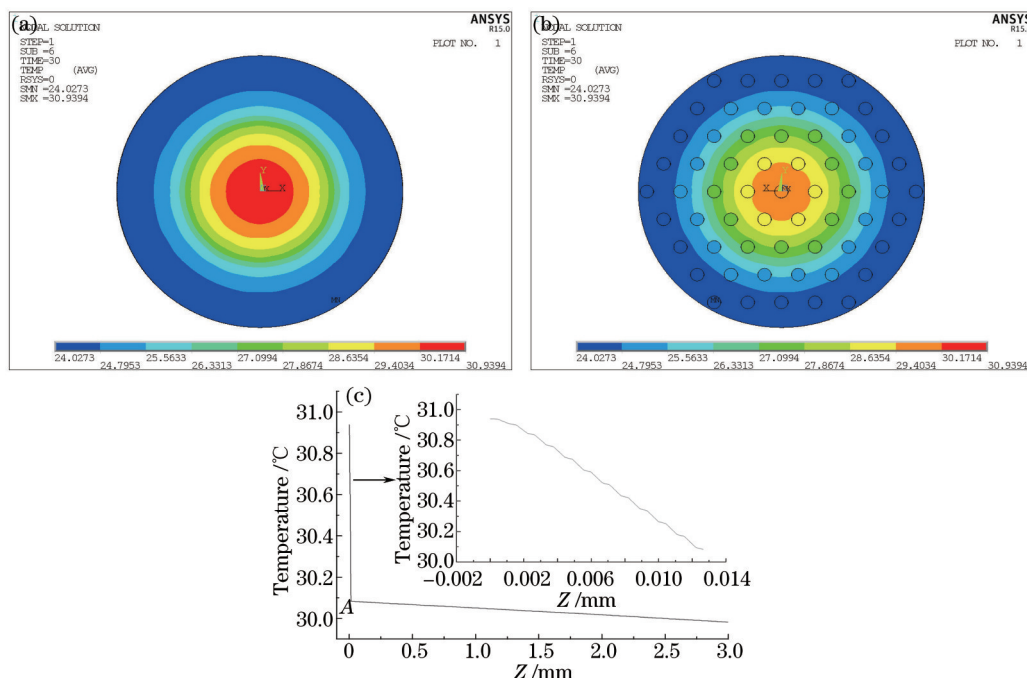


图 4 变形镜温度分布。(a) 前表面;(b) 后表面;(c) z 轴向

Fig.4 Temperature distributions of deformable mirror. (a) Front surface; (b) back surface; (c) z direction

由图 4 可知, 变形镜表面温度分布与入射光斑形状相似。图 4(c) 中 A 点为膜层与基底的接触面, 由于基底材料的热导率远大于薄膜材料, 通过薄膜传递到基底的热量在基底内迅速扩散, 故在该位置处温度梯度出现突变, 进而表现为轴向上膜层内的温度梯度远大于基底内的温度梯度。当忽略膜系时, 膜层与基底间温度梯度的差异将被忽略, 镜面的温度场分布也会有所不同。因此, 在激光连续辐照下, 高反膜系的非均匀吸收不可忽略, 这与文献[6]中所得结论一致。

### 3.2 热形变分布

在实际使用中, 通常以极头对镜面进行支撑, 而极头底部受驱动器约束。按照实际边界条件, 利用 ANSYS 进行分析, 得到变形镜前后表面的热形变分布如图 5(a)、(b) 所示, 在 1.5 倍光束口径范围内, 变形镜  $x$  径向(水平方向)和  $y$  径向(竖直方向)的热形变分布和 PSD 分布如图 5(c)、(d) 所示。

分析图 5(a) 可知, 变形镜的热形变分布与温度场分布相似, 呈现“中间高、四周低”的分布特点。图 5(b) 表明, 变形镜的热形变分布与极头位置存在一定的对应关系, 并且,  $x$  径向的极头间距小于  $y$  径向的极头间距。进一步对比图 5(c) 和图 5(d) 可以看出: 1) AB 段表示变形镜热形变的整体形变包络。由于  $x$  径向和  $y$  径向对应的整体形变包络相似, 因而其 PSD 分量基本相等; 2) BD 段对应“凸起”的数量和大小。与  $y$  径向相比,  $x$  径向上“凸起”数量较多, 单个“凸起”较小, 因此, 在 BC 段内  $y$  径向的 PSD 分量较多, 而在 CD 段内  $x$  径向的 PSD 分量较多。由此可见, 极头间距越小, 热形变引起的畸变频率越高。

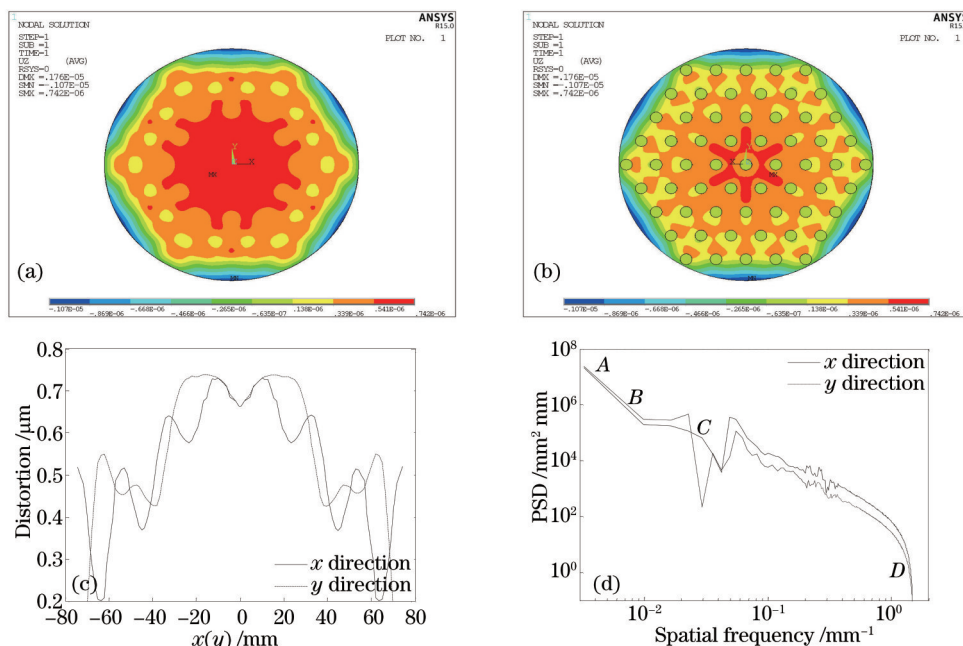


图5 变形镜的热形变分布。(a)前表面;(b)后表面;(c)x、y径向;(d)x、y径向PSD分布

Fig. 5 Thermal deformation distribution of deformable mirror. (a) Front surface; (b) back surface; (c) x and y directions; (d) PSD distributions of the x and y directions

## 4 光束质量影响分析

### 4.1 初始位相的影响

根据(1)式,入射光场分布为圆形平顶高斯分布,即

$$U_0(x, y) = \exp\left\{-\left[\frac{(x^2 + y^2)^{1/2}}{a_0}\right]^{20}\right\}, \quad (3)$$

假设入射激光的初始位相可用随机位相屏来表征,其表达式为<sup>[7]</sup>

$$\varphi_0(x_0, y_0) = \varphi_{0l}(x_0, y_0) + \varphi_{0h}(x_0, y_0), \quad (4)$$

式中  $\varphi_{0l}(x_0, y_0)$  为低频相位畸变,  $\varphi_{0h}(x_0, y_0)$  为高频相位畸变,分别可表示为

$$\varphi_{0l}(x_0, y_0) = A \cdot \text{Random}(-1, 1) \otimes \exp\left\{-\left[\left(\frac{x_0}{g_x}\right)^2 + \left(\frac{y_0}{g_y}\right)^2\right]\right\}, \quad (5)$$

$$\varphi_{0h}(x_0, y_0) = \sigma \cdot \text{Random}(-1, 1), \quad (6)$$

式中  $A$  为低频相位幅度系数,  $\text{Random}(-1, 1)$  表示从-1到1的均匀分布的二维随机数,  $\otimes$  表示卷积,  $g_x$  和  $g_y$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向相位起伏参数,  $\sigma$  为随机相位扰动的幅度。

入射激光经变形镜反射后,热形变面形对入射光场引入的相移可认为是反射表面沿镜面厚度方向的热形变引起的。因此,热形变带来的附加相移为表面位移的两倍。于是,其对光场位相的调制可以表示为

$$U_2(x, y) = U_0(x, y) \exp\{ik[\varphi_0(x, y) - 2\phi(x, y)]\}, \quad (7)$$

式中  $U_0(x, y)$  为入射光的光场分布,  $U_2(x, y)$  为反射光的光场分布,  $\varphi_0(x, y)$  为入射光场的位相分布,  $\phi(x, y)$  为变形镜的热形变面形。

图6给出了1.5倍光束口径范围内,入射波前位相分布及变形镜热形变面形分布。

利用  $\beta$  因子对激光光束质量进行评价,  $\beta$  值越小,光束质量越好。  $\beta$  因子的定义为<sup>[8]</sup>

$$\beta = \sqrt{a_1/a_0}, \quad (8)$$

式中  $a_1$  和  $a_0$  分别表示插中功率比为86.5%时,实际光束和理想光束所对应的面积。

图7对比了考虑和不考虑变形镜热形变时,入射波前峰谷(PV)值对光束质量的影响。计算中,变形镜热

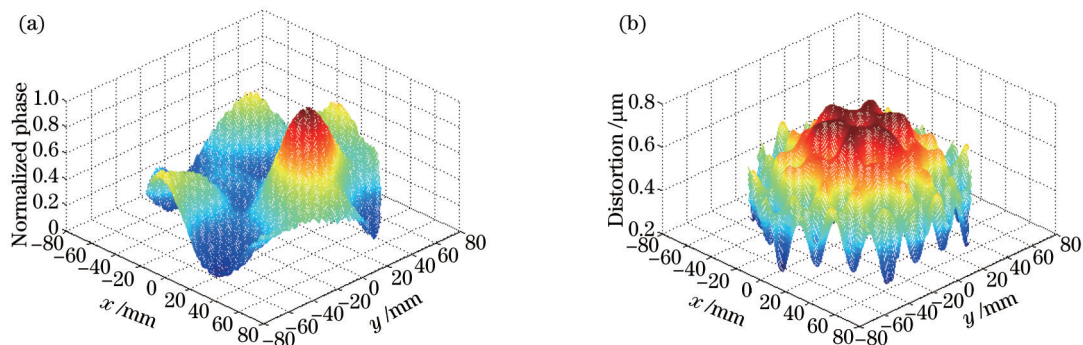


图6 (a)入射波前初始位相和(b)变形镜热形变面形

Fig.6 (a) Distribution of incident wavefront and (b) thermal deformation of deformable mirror

形变面形 PV 值为  $0.5444 \mu\text{m}$ 。

从图7可以看出,当入射波前 PV 值与变形镜热形变面形 PV 值相差不大时,变形镜热形变对光束质量的影响比较明显,而随着入射波前 PV 值的进一步增大,热形变面形带来的影响逐渐减小。由此可见,在对光束质量有较高要求的情况下,变形镜热形变带来的影响不容忽视。

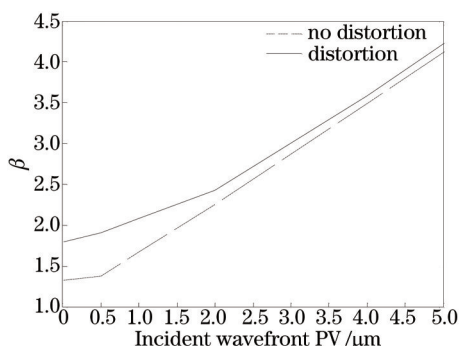


图7 入射波前 PV 值对光束质量的影响

Fig.7 Effect of PV value of incident wavefront on beam quality

#### 4.2 入射功率和辐照时间的影响

在相同结构参数下,不同净吸收功率和辐照时间对光束质量的影响如图8所示,图中  $\beta_0$  表示没有热形变时的远场光束质量。计算中,热交换系数为0,表示变形镜与周围环境没有热交换。

从图8可以看出,随着净吸收功率和辐照时间的增加,对应的光束质量随之变差。由  $W=P \cdot t$  可知,图8中 A、B、C 3点处的膜系总吸收能量相同,但从结果来看,C点处的光束质量最好,A点处的光束质量最差。A、B、C 3点对应的温度分布如图9所示。

图9中,A点对应的温度分布较为集中,而C点对应的温度分布较为分散,这是因为在总吸收能量相同时,辐照时间越长,膜系吸收的能量扩散得越开,整个镜面的温度分布越均匀。

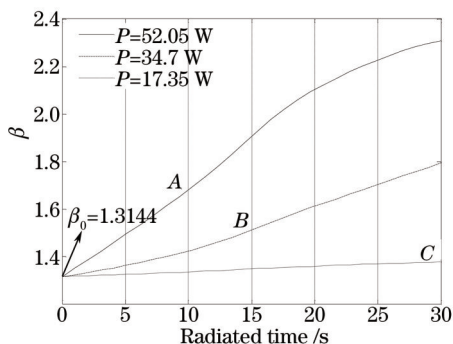


图8 净吸收功率和辐照时间对光束质量的影响

Fig.8 Effect of net absorption and radiated time on beam quality

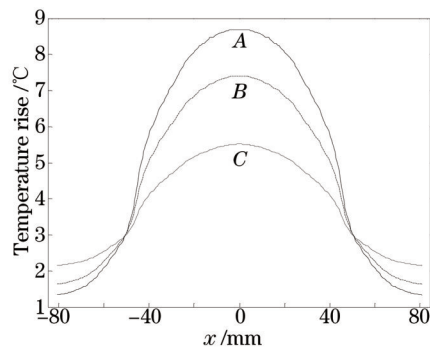


图9 A、B、C 3点对应的温度分布

Fig.9 Temperature distributions of A、B and C

上述分析表明,在总吸收能量一定的情况下,入射激光的功率越高,对应的光束质量越差。由此可见,在高功率激光装置中,光学元件的热形变将成为破坏光束质量的重要原因之一。

## 5 换热分析

由于热形变会对光束质量造成影响,因而在实际工作中,常采用空气对流换热方式对元件进行降温,该过程满足牛顿方程,即

$$q = aS(T_f - T_w), \quad (9)$$

式中  $q$  为对流换热的热流,  $a$  为换热系数,  $S$  为固体壁面换热面积,  $T_f$  为流体温度,  $T_w$  为固体壁面温度。通常情况下,面积  $S$  和固体壁面温度  $T_w$  均为定值。因此,要想获得好的换热效果,只有改变换热系数  $a$  或者流体温度  $T_f$ 。

### 5.1 换热条件的影响

在工程应用中,空气对流换热的最大换热系数约为  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[9]</sup>,越大的换热系数对应越强的气流。然而,在高精密光学装置中,随着气流的增强,可能会对实验装置的稳定性造成影响。因此,实验中换热系数应小于  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。此外,在进行空气对流换热时,极头对气流阻挡会使各位置处的换热效果不同。在此采用简化方案对该问题进行了近似处理:1) 减小换热面积,计算中仅考虑变形镜后表面的对流换热,忽略极头与气流的热交换;2) 在减小换热面积的基础上适当增大换热系数,认为最大换热系数能达到  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

根据该简化方案,计算不同换热系数及流体温度对变形镜热形变及光束质量的影响,其典型结果如图10所示。

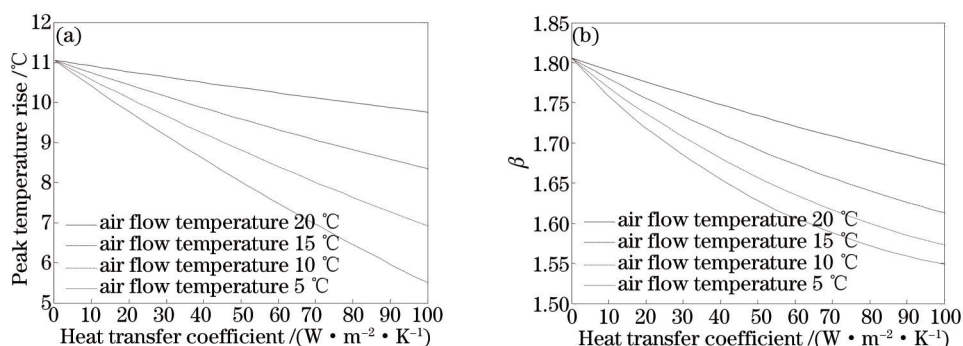


图10 不同换热条件对(a)最高温升和(b)光束质量的影响

Fig.10 Effect of different heat transfer conditions on (a) peak temperature rise and (b) beam quality

从图10可以看出,随着换热系数的增大,变形镜最高温升逐渐降低,热形变对光束质量的影响也随之减小;随着流体温度的降低,变形镜的最高温升近似呈线性降低,但热形变对光束质量的影响却无法随之呈线性减小。当流体温度低于  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  后,继续降低流体温度对光束质量带来的改善效果并不明显。而且,在实际工作中,流体温度不可能无限制地降低,流体与变形镜温差过大可能会对变形镜造成损伤。当流体温度为  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , 换热系数为  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时,光束质量  $\beta = 1.57$ ,而在没有热形变的情况下,光束质量  $\beta_0 = 1.31$ ,表明使用该换热方式对光束质量的改善效果不够理想。

### 5.2 换热方式的影响

将上述换热方式称为整体换热,即对变形镜的整个后表面进行换热。图11比较了流体温度分别为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  时,变形镜表面的温度分布,计算中换热系数取  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。分析图11可知,整体换热只能从整体上降低变形镜的温升,对变形镜表面的温度梯度分布却没有明显影响。而温度梯度分布才是使变形镜产生热形变,进而降低光束质量的主要原因。

针对上述情况,提出了局部对流换热方式,该方式仅对变形镜后表面中心区域进行对流换热,以减小其表面温度梯度分布。图12对比了两种换热方式对镜面温度分布的影响。从图12可以看出,局部换热对应的镜面温升高于整体换热,但前者的温度梯度则明显小于后者。这是因为在换热系数相同的情况下,整体换热所对应的换热面积更大,换热过程中带走的热量更多,相应的温升较低;而局部换热主要针对镜面中心

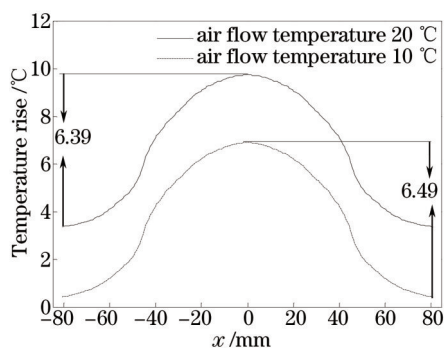


图 11 流体温度对温度梯度分布的影响

Fig.11 Effect of different air flow temperatures on distribution of temperature gradient

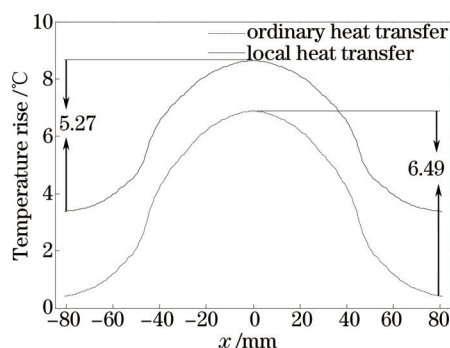


图 12 换热方式对温度梯度分布的影响

Fig.12 Effect of different ways of heat transfer on distribution of temperature gradient

区域进行换热,能有效降低镜面中心与边缘位置间的温度差,进而减小温度梯度分布。

通过计算,得到两种换热方式下,变形镜热形变面形参数及对光束质量的影响,其结果如表 2 所示,计算中换热系数取  $100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

表 2 不同换热方式对光束质量的影响

Table 2 Effect of different ways of heat transfer on beam quality

	Air flow temperature 10 °C			Air flow temperature 5 °C		
	Temperature difference /°C	PV value / $\mu\text{m}$	$\beta$	Temperature difference /°C	PV value / $\mu\text{m}$	$\beta$
Ordinary heat transfer	6.49	0.4207	1.57	6.53	0.3909	1.55
Local heat transfer	5.27	0.4167	1.50	4.86	0.2782	1.45

从表 2 可以看出,在气流强度和温度相同的情况下,局部换热方式对光束质量的改善效果明显优于整体换热方式。由此可见,在进行对流换热时,需要根据具体的温度分布来决定换热区域,以便更好地改善激光辐照下元件表面温度梯度分布对热形变及光束质量的影响。

## 6 结 论

利用 ANSYS 有限元分析软件建立了镀高反射膜系的变形镜热变形分析模型,研究了激光辐照下变形镜的温升和热形变,重点分析了变形镜热形变的特点及其对光束质量的影响,并比较了不同换热情况对光束质量的影响。结果表明:1) 变形镜表面的热形变分布与极头位置存在对应关系,并且,极头间距越窄,热形变带来的畸变高频成份越多;2) 变形镜的热形变会对光束质量造成影响,入射波前 PV 值越小,变形镜热形变对光束质量的影响越明显;3) 入射激光功率越大,热形变对光束质量的影响越大;4) 通过对流换热,能在一定程度上减小变形镜热形变对光束质量的影响。

当入射波前的 PV 值为变形镜热形变面形的 5 倍及以上时,热形变带来的影响可以忽略,而当入射波前 PV 值与变形镜热形变面形 PV 值相差不大时,热形变带来的影响则不可被忽略。在进行对流换热时,局部换热方式比整体换热方式效果更好。因此,在实际工作中,应根据具体的变形镜温度分布来设置换热区域。

## 参 考 文 献

- 1 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, 2012, 39(10): 1002001.
- 2 Li Bin, Jiao Luguang, Liu Liang, et al.. Numerical simulation of water Jet cooled SiC mirror[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0202009.



- 李 斌, 焦路光, 刘 亮, 等. 射流式碳化硅水冷镜数值模拟[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0202009.
- 3 Liu Wenguang, Rao Peng, Hua Weihong. Effect of thermal distortion of Si irradiated by non-uniformity laser intensity on laser propagation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(10): 1615-1619.
- 刘文广, 饶 鹏, 华卫红. 非均匀激光辐照下硅镜热变形对光束传输特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(10): 1615-1619.
- 4 O Albert, L Sherman, G Mourou, *et al.*. Smart microscope: an adaptive optics learning system for aberration correction in multiphoton confocal microscopy[J]. Opt Lett, 2000, 25(1): 52-54.
- 5 Wang Dan. Manufacturing Technology of Small Aberration Piezoelectric Deformable Mirror[D]. Suzhou: Soochow University, 2011. 6-7.
- 王 丹. 小像差压电变形镜制造技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2011. 6-7.
- 6 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.
- 7 Fu Fuxing, Zhang Bin. Recovery of high frequency phase of laser beam with wavefront distortion[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(4): 0402009.
- 付福兴, 张 彬. 激光束畸变波前高频相位的恢复[J]. 中国激光, 2011, 38(4): 0402009.
- 8 Feng Guoying, Zhou Shouhuan. Discussion of comprehensive evaluation on laser beam quality[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(7): 1643-1653.
- 冯国英, 周寿桓. 激光光束质量综合评价的探讨[J]. 中国激光, 2009, 36(7): 1643-1653.
- 9 Yuan Jian, Zhang Weimin, Liu Zhancang, *et al.*. The measurement and calculation of heat transfer coefficient under cooling conditions[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2005, 26(4): 115-119.
- 袁 俭, 张伟民, 刘占仓, 等. 不同冷却方式下换热系数的测量与计算[J]. 材料热处理学报, 2005, 26(4): 115-119.

栏目编辑: 张 雁