

不同夹持方式下不同高反膜系腔镜的热形变分析

吴双 贺也洹 张彬

四川大学电子信息学院, 四川 成都 610064

摘要 在研究高功率激光辐照下激光器腔镜表面热形变分布时通常会忽略其表面镀有的高反射膜系。利用有限元分析软件 ANSYS 比较了特定激光辐照(吸收功率 250 W, 外环半径 4 cm、内环半径 2 cm 的同轴环形光束, 30 s)下的高反腔镜在不同夹持方式下的热形变分布, 同时考虑了腔镜表面镀有的两种不同高反膜系及膜系中的驻波场的影响, 并与通常忽略膜系的情况进行了对比分析。研究表明, 采用压圈法时, 三种情况下热形变分布的差异相对较小; 采用压板法时, 三者形变分布产生了明显的差异, 镜面中心可能上凸、下凹或者平缓; 采用三点法时, 尽管镜面中心热形变分布较为平缓, 但在环状光束辐照区域内三者仍有明显差异。因此, 膜系内驻波场对腔镜热形变分布的影响不能轻易忽略。

关键词 激光技术; 强激光; 高反射镜; 热变形; 驻波场; 夹持方式; 有限元

中图分类号 TN248 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.021402

Analysis of Thermal Distortion of Resonator Mirror with High Reflective Coatings in Different Clamping Ways

Wu Shuang He Yehuan Zhang Bin

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

Abstract In the study of thermal distortion of resonator mirrors under high-power laser irradiation, the high reflective coatings are usually ignored. The thermal distortion distributions of resonator mirrors with high reflectivity fixed in different ways are analyzed by finite element analysis software ANSYS under the specific laser irradiation (absorbed power of 250 W, outer radius of 4 cm, inner radius of 2 cm, co-axial annular beam, 30 s). The effects of two different high reflective coatings and the field distribution of standing wave inside the coatings are considered, and the results are further compared and analyzed with the usual approximate method that the high reflective dielectric coatings are ignored. The results show that, the difference of thermal deformations among the three situations, i.e., considering two different high reflective coatings and ignoring the high reflective coatings, is relatively small when the resonator mirror is clamped radially. However, the difference becomes obvious when the resonator mirror is clamped axially and the center of the mirror can be convex, concave and flat. If the resonator mirror is fixed by three cones, though the center of the mirror can be relatively flat, there is still obvious difference among the three situations in the irradiation zone of the annular laser. Consequently, the contribution of the standing wave inside the high reflective coatings to the thermal distortion of resonator mirrors cannot be ignored in some applications.

Key words laser technique; high-power laser; high reflectivity mirror; thermal distortion; standing wave field; clamping way; finite element

OCIS codes 140.3410; 140.3560; 140.6810; 310.6845; 310.6860

1 引言

在强激光技术领域, 大口径高功率激光器腔镜在强激光辐照下会产生热形变, 从而对激光器输出光束

收稿日期: 2013-07-08; 收到修改稿日期: 2013-10-11; 网络出版日期: 2014-01-20

基金项目: 中国科学院自适应光学重点实验室基金(201303)、四川省教育厅创新团队计划(13TD0048)、四川大学优秀青年学者计划(2011-2-B17)

作者简介: 吴双(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率激光技术方面的研究。E-mail: wsffld@aliyun.com

导师简介: 张彬(1969—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 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。

质量产生影响。镜面热形变主要由材料受热沿轴向的线膨胀、温度变化产生的热应力引起的形变以及因镜体周边受限不能自由膨胀而产生的挠曲变形等部分组成^[1]。当腔镜参数确定以后,镜体的夹持方式就成为关键影响因素。在实际应用中,常采用机械方式夹持腔镜,其对热形变的影响实质就是热弹性体的边界条件效应。常用的腔镜夹持方式有压弹簧圈法(径向固定)、压板法(轴向固定)和三点法夹持^[2]。对于镜体热形变的研究通常利用有限元分析软件 ANSYS^[3-6]。另外,高反射腔镜上往往镀有复杂的高反射膜系,但在通常的研究中为了方便计算而忽略了膜系结构^[9-6]。然而,由于膜系材料与基底材料的热物性质不同,且膜系结构内部存在的驻波场会引起对激光吸收的不同,因而可能会导致热形变的差异。本文基于连续强激光辐照下高反膜系内部的驻波场分布建立了热源模型,并在不同的夹持条件下对比分析了通常忽略膜系的情况下及腔镜表面镀有两种不同高反膜系的情况下腔镜形变的差异。

2 理论模型

假设高反镜的形变对温度场的影响可以忽略,可采用热-结构顺序耦合分析,即先进行相应的热分析,再进行结构分析。一般对于表面镀有高反膜的样品,其内部的驻波场主要存在于与空气层接近的几个膜层之内,其内部光场则难以到达基底。因此,对激光能量的吸收主要来自于膜层,产生的热量一部分在与空气的对流中耗散掉,一部分则被基底所吸收。因此,可根据上述原则对腔镜热效应的热源进行设定,选取合适的边界条件,并利用 ANSYS 有限元分析软件计算结构分析的热载荷,进而求解热形变。由于本文研究的反射镜的尺寸远小于其曲率半径,热形变产生的相移可近似认为是反射表面沿 z 方向的变形引起的。

2.1 膜系内的驻波场

考虑两种不同的 $\lambda/4$ 高反射膜系。膜系 1 为:Sub/H(LH)¹³/Air($\lambda_1=3.8\ \mu\text{m}$, Sub 为 Si, H 为 ZnS, L 为 YbF₃), 利用膜系分析软件 yz-film 计算得到膜层内部驻波场分布,如图 1(a)所示。图中,纵轴为归一化电场强度,横轴为膜层厚度,最左边为一个光学长度的硅基底,最右边为两个光学长度的空气层。计算可得到该膜系厚度 $d\approx 14.867\ \mu\text{m}$, 反射率 $R\approx 99.9816\%$, 吸收率 $A\approx 0.0116\%$ 。膜系 2 为:Sub/H(LH)¹³/Air($\lambda_2=1.315\ \mu\text{m}$, Sub 为 Si, H 为 TiO₂, L 为 SiO₂), 其膜层内部驻波场分布如图 1(b)所示。计算可得到该膜系厚度 $d\approx 5.0505\ \mu\text{m}$, 反射率 $R\approx 99.9825\%$, 吸收率 $A\approx 0.0134\%$ 。从图 1 可以看出,由于膜系结构的类似,

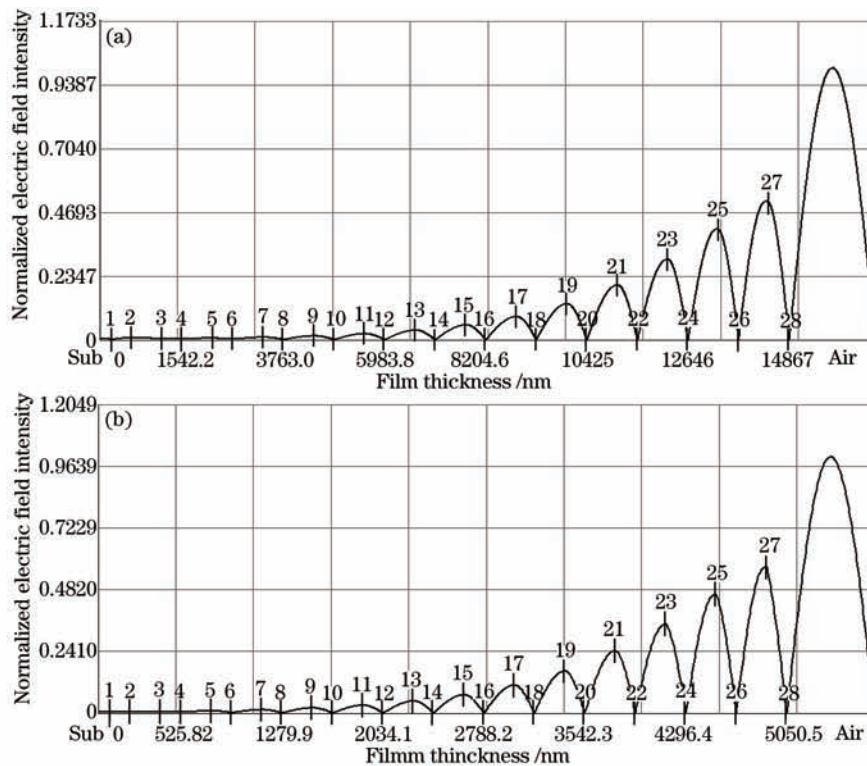


图1 高反膜系内部驻波场分布

Fig.1 Relative intensity distribution of electric field in high reflective dielectric coatings

其内部的驻波场分布也相似。两种膜系内部的光场能量均大多集中在靠近空气的数层薄膜内,而基底中光场能量则几乎为零。

2.2 热源模型

高功率化学激光器一般采用非稳腔,其输出光束通常为环状光束^[9],相应的光场分布可表示为^[10]

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

式中 L 和 M 为环状光束的阶数,当 $M \geq L > 0$ 时,即为环状光束。近似地,外径 $R_1 = (M+1)w_0$,内径 $R_2 = (L-1)w_0$, I' 为入射光功率密度。若固定吸收功率 P ,则有 $I' = P/(AS)$,其中 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,采用等效热源的方式来模拟膜层对激光能量的吸收。如果忽略膜层的影响,其热源可以采用在元件表面加载面热流密度的方式,即

$$Q = AI(x,y), \quad (2)$$

式中膜层吸收率 A 可由膜系分析软件给出。这也是文献中常用的忽略高反膜系的一种近似处理方法^[4-6]。

若考虑多层膜系的影响,则可依据膜系中驻波场的分布建立热源模型。由于入射激光可视为连续的,因而在每一层膜中,沿光轴方向热量的扩散时间几乎可以忽略不计,这意味着每一膜层内沿轴向的吸收可以近似为均匀的。于是,可在每一个膜层分别设置一个独立热源。假设膜系的吸收来自于第 i 层薄膜对光强为 I'_i 的“透射光束”的均匀吸收, I'_i 取决于该膜层内的驻波场波峰及该膜层材料的折射率,而与其余膜层中场强分布无关。于是,每一层中的热源表达式为

$$Q'_i = \alpha_i \frac{I'_i}{I'} I(x,y) \exp(-\alpha_i z_i), \quad (3)$$

式中材料的吸收系数 α_i 取决于消光系数 κ_i 与入射光波长 λ ,即 $\alpha_i = 4\pi\kappa_i/\lambda$ 。沿膜层厚度方向坐标 z_i 的原点位于“透射光束”在第 i 层薄膜的入射界面上。

由于该建模方式中存在一定的近似,由(3)式给出的热源不一定能保证整个膜系吸收率为 A 。考虑到在该模型中,每一层膜吸收的能量正比于该膜层中的“入射”光强,故在(3)式中引入系数 $\eta = AI'/\sum Q'_i dz_i$,以确保采用本文方法确定的整个膜系吸收率与由膜系分析软件给出的吸收率相同。于是,(3)式变为

$$Q_i = \eta \alpha_i \frac{I'_i}{I'} I(x,y) \exp(-\alpha_i z_i). \quad (4)$$

经计算,本文计算例中,有 $\eta_1 = 1.228$, $\eta_2 = 1.160$ 。

2.3 有限元模型

如图2所示,坐标原点在基底面中心,激光沿 $-z$ 轴方向入射,方形镜尺寸为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$,采用热分析单元 Solid90 建模。基底网格单元划分为 $20 \times 20 \times 75$ 。其中,基底厚度方向划分的 75 层由底面向表面线性变密,底面与表面网格厚度比为 2000。对于每一层薄膜,轴向则只划分一层网格。膜层与膜层之间以及膜层与基底之间采用布尔代数 Glue 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。

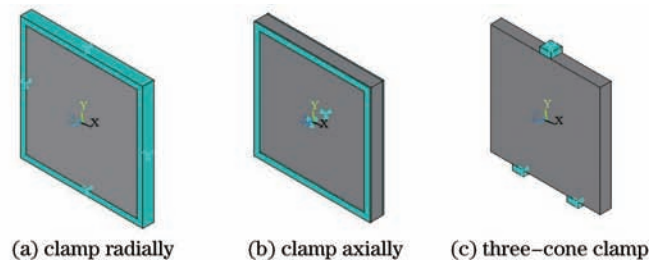


图2 不同夹持方法的有限元模型

Fig.2 Finite element models for different clamping ways

本文计算例中,腔镜分别采用径向固定的压圈法、轴向固定的压板法和三点法三种不同方式进行夹持,并忽略重力对腔镜面形的影响。夹具选用钢材料,密度为 7930 kg/m^3 ,杨氏模量为 $2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$,泊松比为 0.3,夹具与镜体间静摩擦系数为 0.2。在进行有限元分析时往往会根据不同的夹持方式而对边界条件的设

定进行简化,如文献[1]中针对径向固定的压圈法采用的是边界径向固定的物理模型,而没有考虑轴向摩擦力的作用。因此,本文在分析中保留了夹持结构与镜体接触的部分以减少计算误差,在 ANSYS 中的有限元模型如图 2 所示。

3 温度场与形变场分布的有限元分析

计算中,假设对于两种不同的膜系,入射光波长均为其中心波长,即 $\lambda_1 = 3.8 \mu\text{m}$, $\lambda_2 = 1.315 \mu\text{m}$ 。辐照持续时间为 30 s,沿 $-z$ 轴入射。光束外径 $R_1 = 4 \text{ cm}$,内径 $R_2 = 2 \text{ cm}$,对应的光束参数 $M=L=3$, $w_0=1 \text{ cm}$,净吸收功率 $P_{\text{abs}}=250 \text{ W}$ 。表 1 给出了计算所采用材料的相关参数,其中 EX 为杨氏模量,PRXY 为泊松比。由于高反镜温升一般不会很高,因而计算时忽略了材料热物理参数随温度的变化。

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 / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Heat conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	Fo ($\tau = 30 \text{ s}$, $l=0.1 \text{ m}$)	Thermal expansion coefficient / K^{-1}	EX / GPa	PRXY	Refractive index
ZnS	4080	1927	0.19	7.25×10^{-5}	7.1×10^{-6}	74.5	0.29	$2.2-i2.25 \times 10^{-5}$
YbF ₃	8150	361	0.051	5.20×10^{-5}	1.89×10^{-5}	75.79	0.28	$1.4-i3.0 \times 10^{-5}$
TiO ₂	3800	1368	1.8	1.04×10^{-3}	9×10^{-6}	230	0.27	$2.21-i5.0 \times 10^{-5}$
SiO ₂	2100	787	3.53	6.41×10^{-3}	5.8×10^{-7}	73.1	0.17	$1.44-i1.0 \times 10^{-5}$
Si	2329	690	173.6	0.324	2.6×10^{-6}	130.91	0.28	$3.44-i2.4 \times 10^{-8}$

3.1 腔镜的温度场分布

假设室温为 300 K,在径向边界上绝热,后端面与空气有热交换,其热交换系数取为 $8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。图 3 给出了激光连续辐照 30 s 后,采用两种不同方法计算得到的镜面 $+x$ 方向上温度场分布。

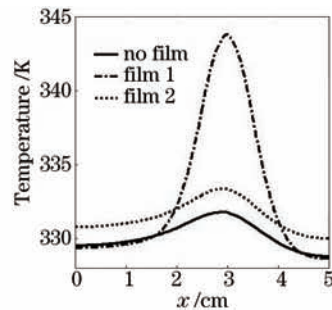


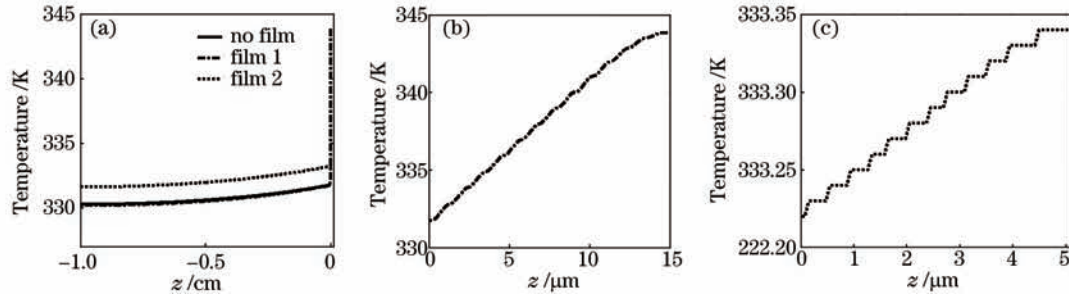
图 3 镜面温度场分布的比较

Fig.3 Comparison of temperature distributions

由图 3 可见,当考虑膜层时,腔镜表面的温度整体高于忽略膜层时的情况,且随着膜系的不同,腔镜表面温度分布也有明显不同。这主要是由于膜层和基底不同材料的热物理性质不同而引起的。四种膜材料与 Si 基底的热导率的差别远远超过三种材料的密度与比热容的差别,因此,膜材料具有更小的傅里叶数 F_0 ,如表 1 所示。这意味着膜层材料导热性比基底更差,且对于堆叠成膜系 1 的 ZnS 和 YbF₃ 材料而言,其差别更为显著。因此,在激光连续辐照镜面 30 s 后,仍然有相当一部分能量堆积在膜层内而没能及时传导进入基底,从而导致膜层中沿光轴方向出现相对较高的温度梯度,且对于膜系 1 更加明显。

为了说明这一点,图 4(a)给出了镜面最大温升点附近($x=0.03 \text{ m}, y=0$)温度场的轴向分布,图 4(b)和(c)则分别给出了两种膜系内温度场的轴向分布。其中, $z=0$ 处为膜层与镜面的界面。可见膜系 1 中膜层内温差达到了 12.1 K,而膜系 2 中膜层内的温度差则相对较小,约为 0.121 K,但相对于基底而言平均温度梯度仍高出了两个数量级。

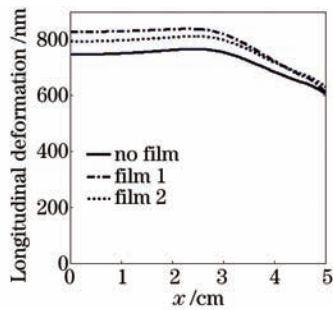
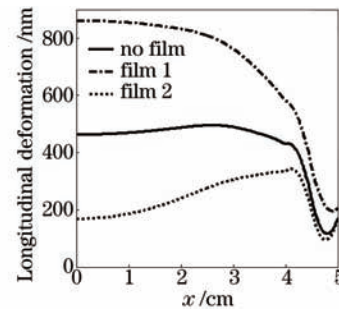
由此可见,当其余条件一致时,表面镀有不同的膜系将导致腔镜表面温度场的分布有所不同,在此时不应忽略膜系的影响。

图4 $x=0.03$ m, $y=0$ 处温度场的轴向分布比较Fig.4 Comparison of temperature distributions along z axis at $x=0.03$ m, $y=0$

3.2 腔镜的热形变分布

在相同的边界条件下,腔镜表面热形变取决于其表面温度梯度以及材料热物理性质。通常文献中忽略膜系的理由是反射镜膜层和基底内的热扩散长度均已远远大于膜层的总厚度。本文计算例中,考虑多层膜系后,腔镜表面温度分布产生了明显的不同。这究竟能够对最终腔镜表面热形变带来多大的影响,在接下来的计算中将进行探究。

图5~7分别给出了采用压圈法、压板法和三点法夹持时的腔镜热形变分布。

图5 径向固定时 x 轴方向上镜面的热形变分布比较Fig.5 Comparison of thermal distortions along x axis by radial fixing图6 轴向固定时 x 轴方向上镜面的热形变分布比较Fig.6 Comparison of thermal distortions along x axis by axial fixing

对于图5所示的采用径向固定的压圈法,在光束辐照区域内腔镜热形变曲线的峰-谷(PV)值、均方根(RMS)值及引起的最大形变量 Z_{\max} 列于表2。由图5可见,采用径向固定的压圈法时,光束辐照区域内的腔镜热形变曲线的形状比较相似,但其起伏程度存在一定的差异。进一步分析图5可知,考虑膜系时存在更大的热形变,且在镀有ZnS与YbF₃堆叠而成的膜系1的情况下形变整体最大。若比较辐照区域内最大形变量 Z_{\max} ,相对于通常的处理方式而言,考虑两种不同的膜系将分别有9.43%和5.96%的差异。

表2 径向固定时辐照区域内热形变比较

Table 2 Comparison of heat distortions in irradiation area by radial fixing

Material	PV		RMS		Z_{\max}	
	PV value /nm	Relative error /%	RMS value /nm	Relative error /%	Z_{\max} /value	Relative error /%
Sub	80.58	/	25.20	/	$0.2014 \lambda_1 / 0.5820 \lambda_2$	/
ZnS/YbF ₃	114.2	41.7	36.04	43.0	$0.2204 \lambda_1$	9.43
TiO ₂ /SiO ₂	91.91	14.1	28.84	14.4	$0.6167 \lambda_2$	5.96

对于图6所示的采用轴向固定的压板法,光束辐照区域内形变曲线的PV值、RMS值与引起的最大形变量如表3所示。从图6可以看出,三种情况下形变分布存在较大的差异。当只考虑基底时,镜面上除了边缘部分因与夹具的接触而存在畸变外,总体分布大致平缓。对于膜系1,镜面中心有着明显的凸起,而对于由TiO₂和SiO₂堆叠而成的膜系2,镜面中心则是下凹。

对于图5所示的径向固定的压圈法,镜体边缘 x 与 y 向自由度被约束, z 向所受镜体与夹具摩擦力的限制较轻,因而镜面膨胀时有向中心“挤”的倾向,从而致使三种情况下形变分布有着较为类似的形态。而对

于图6所示的轴向固定的压板法,镜体边缘 z 向自由度被约束, x 与 y 向所受镜体与夹具摩擦力的限制较轻,因而导致镜面膨胀不仅可以沿 z 向,也可以沿 x 与 y 向。此时,考虑到入射光束为环形,镜面有从具有较高温度的辐照区域(2~4 cm)向镜面中心和镜面边缘膨胀的倾向。对于膜系1,膜层的膨胀比基底较易,且膜层中有相对基底更剧烈的温度变化(图4),因此,存在向镜面中心“挤”的趋势,使得镜面中心产生了凸起。对于膜系2,膜层的膨胀较基底难,且膜层中温度的变化较为平缓,因此,膜层有被膨胀的基底“扯”的趋势,使得镜面中心产生了凹陷。

表3 轴向固定时辐照区域内热形变比较

Table 3 Comparison of thermal distortions in irradiation area by axial fixing

Material	PV		RMS		Z_{\max}	
	PV value /nm	Relative error /%	RMS value /nm	Relative error /%	Z_{\max} /value	Relative error /%
Sub	65.40	/	18.49	/	$0.1300 \lambda_1 / 0.3757 \lambda_2$	/
ZnS/YbF ₃	251.5	285	74.88	350	$0.2190 \lambda_1$	68.5
TiO ₂ /SiO ₂	95.02	45.3	28.71	55.3	$0.2541 \lambda_2$	-32.4

由此可见,在采用压板法夹持时,镜面形变分布可能会因表面所镀制膜系的不同而产生非常明显的差异,这是通常忽略膜系结构的方法所不能分析得到的。若比较辐照区域内最大形变量,相对于通常的处理方式而言,考虑两种不同的膜系将分别有68.5%和-32.4%的差异。

对于图7所示的三点法,在光束辐照区域内腔镜热形变曲线的PV值、RMS值及引起的最大形变量列于表4。图7(a)为 y 轴方向,图7(b)为 $+x$ 轴方向的形变分布。由图7可见,三点法综合了前两种夹持方法的特点,镜面 z 向自由,边缘 x 与 y 向部分被约束。这样可以具备压板法的优点,放开镜体 x 与 y 向的自由度,从而有可能减少最大变形量,以至于减少附加相移量。同时该方法也具备压圈法的优点,使得镜面中心的形变较为平缓。忽略膜系与考虑两种膜系的三种情况下,整体形变分布有类似的形态,但是考察环状光束的辐照区域,由表4可知,仍存在明显差异,特别以膜系1的情况为甚。

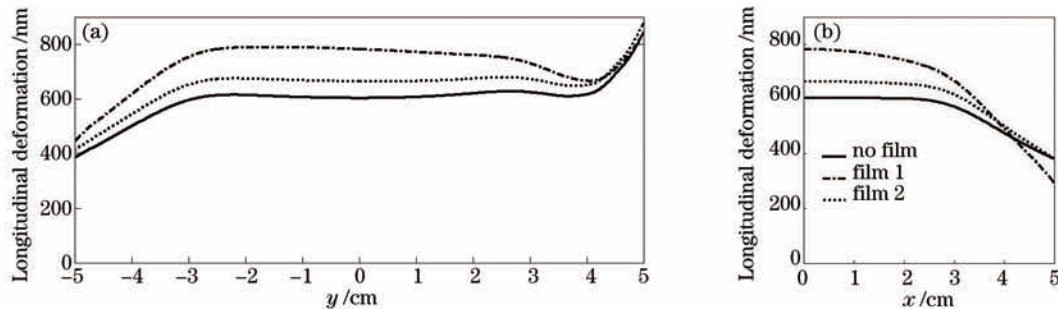


图7 三点法固定时镜面的热形变分布比较

Fig.7 Comparison of thermal distortions by three-cone fixing

表4 三点法下辐照区域内热形变比较

Table 4 Comparison of thermal distortions in irradiation area by three-cone clamping

Clamping position	Material	PV		RMS		Z_{\max}	
		PV value /nm	Relative error /%	RMS value /nm	Relative error /%	Z_{\max} /value	Relative error /%
-y	Sub	115.1	/	35.68	/	$0.1616 \lambda_1 / 0.4668 \lambda_2$	/
	ZnS/YbF ₃	172.3	49.7	53.02	48.6	$0.2075 \lambda_1$	28.4
	TiO ₂ /SiO ₂	131.4	14.2	40.80	14.4	$0.5125 \lambda_2$	12.2
+y	Sub	18.02	/	6.267	/	$0.1650 \lambda_1 / 0.4769 \lambda_2$	/
	ZnS/YbF ₃	94.92	427	32.50	419	$0.2001 \lambda_1$	21.3
	TiO ₂ /SiO ₂	31.14	72.8	11.82	88.6	$0.5157 \lambda_2$	8.14
+x	Sub	124.6	/	38.66	/	$0.1581 \lambda_1 / 0.4567 \lambda_2$	/
	ZnS/YbF ₃	250.8	101	75.67	95.7	$0.1955 \lambda_1$	23.7
	TiO ₂ /SiO ₂	153.8	23.4	47.40	22.6	$0.4977 \lambda_2$	8.98

综合比较三种夹持方式的结果可知,采用径向固定的压圈法时,忽略膜系与考虑两种膜系的形变分布具有类似的形态及相对较小的差异,但总体具有最大的热形变量;采用轴向固定的压板法时,由于膜系与基底材料膨胀能力的不同,将会导致形变分布产生很大的差异,即忽略膜系时形变分布非常平缓,考虑膜系1时镜面中心凸起,考虑膜系2时镜面中心下凹;采用三点法时,忽略膜系与考虑两种膜系的形变分布在整体上具有较为类似的形态,在靠近镜面中心时比较平缓,但在环状光束的辐照区域内仍存在明显差异。总的来说,膜层材料与基底材料在传热能力与热形变能力上的差别是关键。

4 结 论

利用有限元分析软件 ANSYS 研究了强激光辐照下镀有高反射膜系的激光器腔镜的温度场和热形变,基于高反射膜系中的驻波场分布建立了热源模型,并重点分析了其在不同夹持条件下所带来的影响。结果表明,考虑了两种不同膜系中驻波场的影响后,计算得到的结果与通常忽略膜系的近似手段得到的结果存在明显的差别,且对于不同的夹持方式,其对热形变的影响程度有所不同。在本文计算例中,采用径向固定的压圈法时,考虑两种不同的膜系与忽略膜系,其热形变分布有相对较小的差异;采用轴向固定的压板法时,形变分布的结果产生了明显的不同,镜面中心可能上凸、下凹或者平缓;采用三点法时,尽管镜面中心热形变分布较为平缓,但是在环状光束辐照区域内,仍存在明显差异。由此可见,在研究强激光辐照下镀有高反射膜系激光器腔镜的温度场及热形变分布时,膜系内驻波场的影响不能轻易忽略。

参 考 文 献

- 1 Sun Feng, Cheng Zuhai, Zhang Yaoning, *et al.*. Effects of clamping methods for laser mirrors on thermal deformation [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(8): 751-754.
孙 峰,程祖海,张耀宁,等. 激光器腔镜夹持方式对热变形的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(8): 751-754.
- 2 Yu Wenfeng, Sun Feng, Cheng Zuhai, *et al.*. Effects on the mirror's thermo-deformation and deflection of different supporting way[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(1): 29-32.
余文峰,孙 峰,程祖海,等. 夹持方式对镜面热变形及偏转的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(1): 29-32.
- 3 Qi Wenzong, Huang Wei, Zhang Bin, *et al.*. Finite element analysis of thermal distortion of infrared CW laser reflectors [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(8): 953-956.
齐文宗,黄 伟,张 彬,等. 红外连续激光反射镜热畸变的有限元分析[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(8): 953-956.
- 4 Peng Yufeng, Cheng Zuhai. Finite element analyses of thermal distortions of mirror substrates for high power lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(1): 5-8.
彭玉峰,程祖海. 强激光反射镜基体材料的热畸变特性有限元分析[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(1): 5-8.
- 5 Liu Wenguang, Rao Peng, Hua Weihong. Effects of thermal distortion of Si mirror 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.
- 6 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.
- 7 Chen Xu, Yuan Wenquan, Feng Yutao, *et al.*. Study of the error of the reference lens in absolute spherical testing and the thermal deformation model establishment[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0212002.
陈 旭,袁文全,冯玉涛,等. 绝对检验参考镜误差分析与热变形模型建立[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0212002.
- 8 Zhong Xianyun, Fan Bin, Zeng Zhige, *et al.*. Design simulation and optimization for the flexible displacement support structure based on ϕ 1.8 m lightweight reflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322002.
钟显云,范 斌,曾志革,等. ϕ 1.8 m 轻质镜能动磨盘技术抛光的柔性限位支撑设计仿真与优化分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322002.
- 9 He Yuanxing, Li Xinyang. Influence of threshold method on calculation results of far-field spot quality[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(12): 1208001.
贺元兴,李新阳. 阈值法对激光远场焦斑质量测量和计算的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1208001.
- 10 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.