文章编号 2095-1531(2020)03-0442-09

激光空间合束主镜优化设计与分析

汤 伟[1,2], 刘立生[1], 刘 扬[1*], 邵俊峰[1,2], 郭 劲[1,2]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要: 本文对激光空间合束主镜进行优化设计与分析, 以抑制强激光空间合束系统主镜热畸变, 提高主镜面形精度。首先, 对比分析了选择不同材料作为主镜基底的优缺点, 从理论上初步确定了主镜材料、镜体厚度、支撑方式和轻量化结构形式; 然后, 利用有限元方法对空间合束主镜进行了热畸变分析, 并结合热畸变结果对镜体结构形式进行拓扑优化设计; 最后, 对主镜进行重力、环境适应性和基频分析, 验证设计的合理性。分析结果表明: 6 光合束主镜在单束 10 kW 激光辐照下, 随着辐照时间的增加, 镜面温升值和 P-V 值逐渐增大; 辐照 3 min 后初设计主镜表面温度达 83.4 ℃, P-V 值为 155 nm, 受镜体结构影响, 辐照区内热畸变值不一致, 差值约占镜面 P-V 值的 1/6; 为改善热畸变的不一致性, 提高镜体强度, 对主镜进行拓扑优化设计, 优化后主镜轻量化达 54.5%, 辐照区热畸变一致性好, 镜面热畸变量减小了近 1/3; 不同俯仰姿态下, 主镜重力变形值基本相同, 不足 10 nm; 环境温度的改变会引起主镜的镜面畸变和平移, 稳态温差值越大, 主镜面形 P-V 值和镜面平移量越大; 模态分析显示主镜基频满足系统要求。本文研究结果将对激光空间合束系统的设计提供依据。

关 键 词: 大功率激光; 空间合束; 主镜; 激光热畸变; 轻量化设计
中图分类号: TN244 **文献标志码:** A **doi:** 10.3788/CO.2019-0161

Optimization and analysis of a primary mirror for a laser incoherent combining system

TANG Wei[1,2], LIU Li-sheng[1], LIU Yang[1*], SHAO Jun-feng[1,2], GUO Jin[1,2]
(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun* 130033, *China*;
2. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: Liuyangdk@ciomp.ac.cn*

Abstract: A primary mirror for a high-power laser incoherent combining system was designed and analyzed. Firstly, the material and the thickness of the primary mirror, it's supporting way and it's lightweight scheme were determined through theoretical analysis. Then, the thermal deformation of the primary mirror was calculated by the finite element method, and the topology optimization was executed according to thermal deform-

收稿日期: 2019-09-27; **修订日期:** 2019-10-15
基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室自主基础研究资助项目(No. SKLLIM1805)
Supported by National Key Laboratory of Laser Matter Interaction (No. SKLLIM1805)

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ation results. Finally, the impact of gravity, base frequency and ambient temperature on the P-V value of the primary mirror was analyzed. The calculation results show that the temperature rise ΔT and the P-V value of the primary mirror gradually increase when irradiated by six lasers with a power of 10 kW over a greater amount of time. When laser irradiation time reaches 3 min, the temperature rise ΔT and the P-V value of the unoptimized primary mirror are 83.4 ℃ and 155 nm respectively, resulting in thermal deformation values in the irradiated area that are inconsistently affecting by the structure. Its D-value was about 1/6 that of the primary mirror. After topology optimization, the lightweight rate of the primary mirror was 54.5%, the thermal deformation value in the laser-irradiated area was consistent, and the P-V value of the primary mirror reduced to 1/3. The gravity deformation value of the primary mirror at different pitching angles was basically the same and the maximum P-V value was less than 10 nm. The ambient temperature causes distortion and defocus aberration, and with an increase in ambient temperature, the aberration grows. Modal analysis shows that the base frequency of the primary mirror meets the system requirement. These conclusions have a referential value for high power laser incoherent combining systems.

Key words: high power laser; incoherent combining; primary mirror; laser thermal deformation; light weight

1　引　言

在激光加工、激光通信等领域, 提高输出功率的同时还需保证良好的光束质量[1]。采用多模块结构实现多路激光合成输出已成为获取高功率、高 M^2 因子激光的主要技术途径, 引起了国内外科研人员的高度关注[2-4]。光束合成主要分为相干合成、光谱合成和空间合成。空间合成是用定向器控制每个阵元光束的出射方向, 使其会聚在目标靶面上, 从而获得高功率密度激光[5]。

主镜作为激光空间光束合成的关键, 其性能直接决定了光束空间合成效果。国内外对于大口径光学主镜的设计进行了大量研究[6-10]。王富国对大口径主镜开展轻量化[6] 和支撑点位置[7] 的优化设计研究, 宫辉[8] 等人则对主镜背部筋板布局进行设计研究, 以上研究主要是针对光学成像系统的, 而关于高能激光发射系统, 尤其是针对空间合束系统的主镜设计的研究则未有报道。由于激光功率密度过高, 强激光在传输过程中会引起光学元件发生热畸变, 引入热像差, 从而降低输出激光的光束质量[11]。因此, 开展激光空间合束主镜设计研究十分必要。

本文针对激光空间光束合成主镜进行详尽设计, 从材料、镜厚、支撑方式以及轻量化形式 4 个方面对 Φ600 mm 主镜初步进行了结构设计, 并利用有限元方法对主镜进行了激光热畸变分析和拓扑优化设计, 最后进行了主镜的重力、环境适应性和基频分析, 验证了设计结果的合理性。

2　主镜设计方法

2.1　主镜材料选择

在强激光作用下, 大口径反射镜材料的选取除需考虑材料的比刚度外, 还需考虑材料的热畸变特性。有如下规律: 比刚度越大, 镜面变形越小, 主镜抵抗抛光、重力和装配带来的镜面变形能力越强; 热畸变越小, 主镜的热变形和热惯性越小, 热稳定性能也就越好。

目前常用的大口径主镜材料[6] 主要为 Be、熔石英、微晶玻璃、ULE 低膨胀玻璃和 SiC, 表 1 给出了上述材料的热物理参数。

从表 1 数据可以看出: SiC 材料的热畸变最小, 比刚度仅次于 Be, 综合性能较好, 其缺点是 SiC 的加工制造工艺复杂, 价格较为昂贵; 微晶玻璃 (Zerodur) 的热畸变性能较好, 仅次于 SiC 和 ULE, 比刚度略差, 材料和加工费用适中; ULE 低膨胀玻璃与微晶玻璃 (Zerodur) 综合性能不相

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

上下，ULE 的热畸变略小，而微晶玻璃的比刚度略高，价格上二者基本相同；Be 的比刚度最好，但热畸变特性较差，仅优于普通玻璃，而且 Be 有毒，加工制造费用较高，仅在特定环境下使用；熔石英的综合性能最差，热畸变特性远高于其他材料，但熔石英的加工制造工艺非常成熟，价格便宜。

综合考虑，鉴于微晶玻璃材料容易获得，加工方法成熟，综合性能较好，成本适中，故选用微晶玻璃 (Zerodur) 作为主镜材料。

表 1　常见主镜材料的热物理参数

Tab. 1　Main parameters of common primary mirror materials

材料	密度(g/cm³)	弹性模量(GPa)	比刚度(E/ρ:10^6)	比热C (J/kg·℃)	热膨胀系数α(10^{-6}/K)	热导率K(W/mK)	热畸变(α/K; 10^{-8})	泊松比μ
SiC	3.05	400	12.6	680	2.2	185	1.3	0.16
Zerodur	2.5	92	3.7	821	0.05	1.46	3.4	0.24
ULE	2.2	67	3.1	766	0.03	1.3	2.3	0.17
Be	1.85	280	15.1	1 925	11.4	160	7.2	0.05
熔石英	2.2	74	3.36	1 210	0.56	1.38	40.5	0.17

2.2　确定主镜厚度

主镜厚度是影响镜体结构的重要因素。对于圆形反射镜，径厚比与自重变形满足如下经验公式[10]：

$$\delta = \frac{3\rho g\left(D/h\right)^2 D^2}{256E}, \tag{1}$$

式中，δ 为镜面变形最大波峰-波谷 (P-V) 值 (mm)，ρ 为密度 (kg/m³)，g 为重力加速度 (m/s²)，E 为弹性模量 (Pa)，D 为主镜直径 (mm)，h 为主镜厚度 (mm)。

系统中主镜自重的变形要求为 $\delta<\lambda/20$ (λ= 1 064 nm)；主镜直径 D 为 600 mm，中空直径为 160 mm，将表 1 中微晶玻璃热物理参数代入式 (1)，可得主镜厚度应大于 88 mm。另外，主镜厚度还与材料的比刚度(E/ρ)、支撑方式及轻量化形式等因素有关，依据工程经验：对于圆形反射镜，镜厚比一般为 6∶1~10∶1。综上，主镜厚度最终确定为 92 mm。

2.3　确定主镜支撑方式、位置及支撑点数目

主镜支撑选用背部支撑辅以中心支撑的方式。背部支撑中支撑元件胶接在反射镜背部，支撑元件采用柔性结构，以减少热效应对主镜面形的影响；中心支撑适用于有中心孔的反射镜，轴和反射镜中心孔紧密配合，主要起定位和约束作用。

对于背部支撑，大口径圆形反射镜所需的最少支撑点数 N 的经验公式为[12]：

$$N = \frac{1.5r^2}{h}\sqrt{\frac{\rho g}{E\delta}}, \tag{2}$$

式中 r 是圆形反射镜半径。

经计算，N≈3.46。由于背部 6 点支撑存在明显过定位问题，工程上极少采用，又考虑到系统中主镜的尺寸以及实际的面形要求，因此，系统采用背部 9 点支撑。

背部 9 点支撑采用传统机械式 Whiffle-tree 浮动支撑结构，即将支撑位置分为内外两圈分布，内圈 3 点，外圈 6 点，内圈一点和相邻的外圈两点为一组，每组通过一个连接板固连，结构形式如图 1 所示。

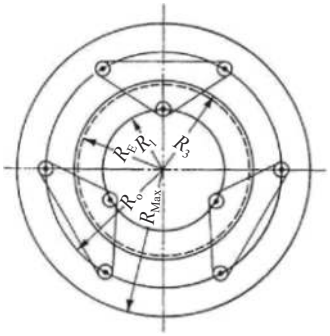


图 1　Whiffle-tree 九点支撑结构

Fig. 1　Whiffle-tree nine-point support structure

Hindle 给出了浮动支撑设计公式[12]：

$$R_1 = \left(\frac{\sqrt{3}}{12}\right)D = 0.144D, \tag{3}$$

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$R_0 = \left(\frac{\sqrt{6}}{6}\right)D = 0.408D, \quad (4)$$

式中 D 为主镜直径。

通过计算可得, 外圈支撑半径 R_0 和内圈支撑半径 R_1 的理论值分别为 244.8 mm 和 86.4 mm。由于系统中主镜中空, R_1 应大于理论值, 因此, R_0 和 R_1 分别取 250 mm 和 120 mm。

2.4　主镜轻量化设计

2.4.1　轻量化形式

大口径反射镜背部轻量化形式主要有开放式、封闭式和半开放式。根据以往的设计经验知: 背部开放式加工工艺性较好, 反射镜基体和背部可通过一次加工完全成型, 大口径反射镜多采用背部开放式结构; 此外, 三角形孔尽管轻量化率略低, 但由于结构刚度好, 环境适应性强, 各方向物理性能均衡, 更利于获得良好的镜面面形, 在工程上应用较广。因此, 主镜轻量化形式选用背部开三角形孔的轻量化形式。

2.4.2　确定镜面厚度

轻量化设计要避免网格效应。网格效应是指在主镜进行光学加工时, 由于压力作用, 在轻量化孔处镜面会产生弹性变形, 从而导致去除量下降, 最终在主镜表面形成类似网格的效应。为避免网格效应, 加工过程中每个减重孔单元的最大变形量 δ 需要控制在一个允许值以内, 并给出最大变形量 δ 的经验公式[8]:

$$\delta = \frac{12\psi PB^4(1+\mu^2)}{Eh_0^3}, \quad (5)$$

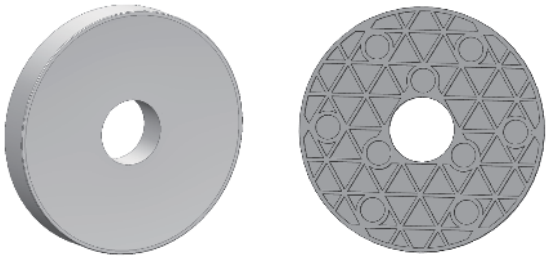
式中: Ψ 是和轻量化孔形状有关的形状因子, 取值不同, 对于三角形轻量化孔, Ψ 取 0.001 51; P 为加工过程中施加在反射镜表面的加工压力, 一般取 65 kPa; B 为孔内接圆直径; h_0 为镜面厚度。

根据设计要求, 内接圆直径 B 取 50 mm, 则由公式 (5) 计算后可得镜面厚度 h_0 应大于 11.9 mm, 结合实际应用, 设计时取镜面厚度 h_0 为 12 mm。

2.4.3　主镜背部筋厚及壁厚设计

主镜采用九点浮动支撑结构, 背部支撑元件起到定位、支撑作用。为了平衡掉主镜在不同姿态下的重力作用, 主镜的筋板和内、外壁需要承受一定的压力, 所以主镜的背筋和内、外壁需要有足够的强度, 即厚度不能太薄, 总体上, 内、外壁厚应略大于筋厚。本文中, 内、外壁厚 t_1 取 10 mm, 筋厚 t_2 取 8 mm。

依据上述计算结果, 建立外径为 600 mm, 内径为 160 mm, 厚度为 92 mm, 背部开三角形孔的主镜模型, 如图 2 所示。



(a) 正面　(b) 背面
(a) Front　(b) Back

图 2　轻量化主镜模型示意图

Fig. 2　Structural diagrams of lightweight primary mirror

轻量化孔采用一次性加工成型, 背部支撑孔直径为 60 mm, 经计算主镜轻量化后的总重量为 27 kg, 轻量化率为 50%。

3　主镜热畸变分析与优化设计

3.1　激光热畸变分析

将高能激光正入射到主镜表面, 由于存在激光热吸收, 会导致镜体温度升高, 镜面发生热变形, 产生附加相位, 从而影响合束激光聚焦效果。

空间合束激光为 6 束光学参数完全相同的高斯光束, 且均匀分布在主镜 Φ 400 mm 的圆周上。入射光源为连续激光, 波长为 1 064 nm, 激光功率为 10 kW, 辐照到主镜上的光斑大小为 200 mm, 辐照时间为 3 min, 环境温度为 22 ℃。

系统要求主镜面形 P-V 值优于 λ/8 (λ=1 064 nm), RMS 值优于 λ/40。利用 ANSYS18.2(Workbench) 有限元软件对合束主镜进行温度-结构场的耦合分析, 计算结果如图 3 所示。

由图 3 可以看到: 随着辐照时间 t 的增加, 主镜表面温度 T 和 P-V 值均逐渐增大, 且在 3 min 内主镜未达到热平衡; 辐照时间为 3 min 时, 主镜温度 T 为 83.4 ℃, P-V 值为 155 nm, 约为 λ/7, 略低于指标要求。主镜热畸变将降低激光远场的聚

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

焦能力，图 4(彩图见期刊电子版)给出了辐照时间为 3 min 时，主镜的有限元仿真云图。

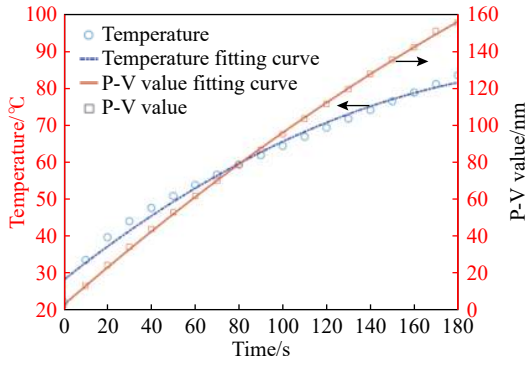
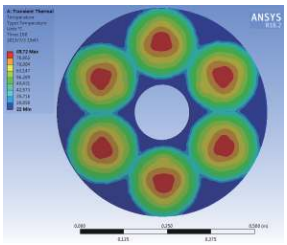
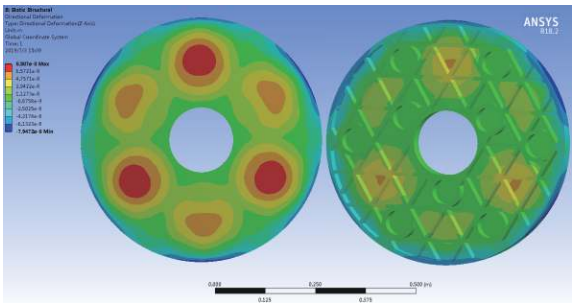


图 3 合束主镜温度、镜面 P-V 值与辐照时间 t 的关系

Fig. 3 Relationship between temperature、P-V value of primary mirror and irradiation time



(a) 温度场云图
(a) Temperature cloud chart



(b) 热变形云图
(b) Thermal deformation cloud chart

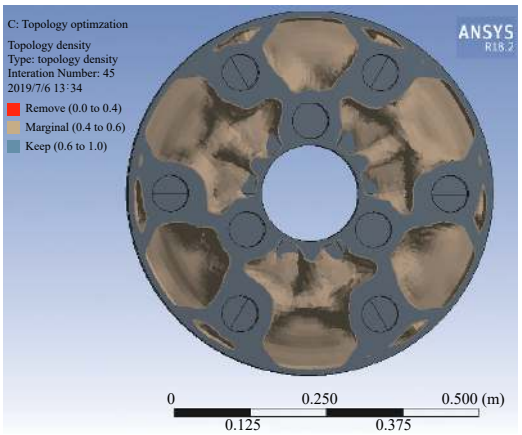
图 4 微晶玻璃主镜有限元仿真结果

Fig. 4 Simulation results of Zerodur primary mirror

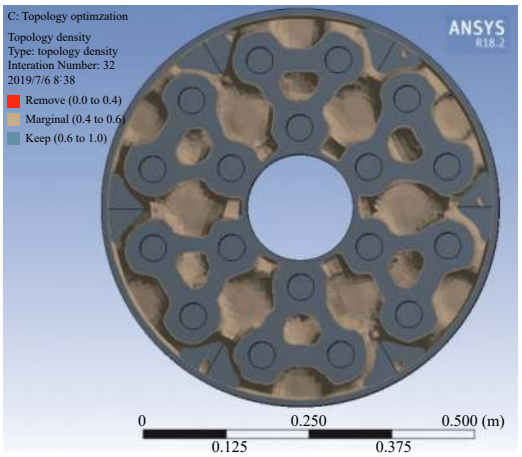
由图 4(a) 可以看到：激光辐照区域的温度明显高于非辐照区域，说明强激光辐照会造成主镜表面温度升高。对于激光合束系统，由于入射激光功率密度相同，温升值相同且呈六瓣均匀分布。由图 4(b) 可以看出，主镜热变形主要与入射激光的位置有关，热变形主要由镜面温升造成，其分布与温度场情况一致，但六束激光造成的热变形值略有不同，浮动支撑处热变形量小于其它 3 处，相差约 25 nm，约为 P-V 值的 1/6。这说明增加辐照区支撑强度可以有效减小镜面热变形量。由此可知，对主镜结构和支撑方式进行优化设计，提高主镜强度可以有效抑制主镜热畸变。

3.2 主镜的拓扑优化

结构拓扑优化是目前应用较为广泛的结构轻量化方法。对 9 点浮动支撑和 18 点浮动支撑下的主镜进行拓扑优化，区别于传统大口径成像主镜的优化设计，激光合束主镜需重点考虑热效应对主镜面形的影响，设计时以镜面 P-V 值为优化准则，主镜质量为优化目标，激光热加载为输入条件，利用 ANSYS18.2(Workbench) 进行拓扑优化，拓扑优化结果如图 5 所示。



(a) 9点支撑
(a) Nine-point support



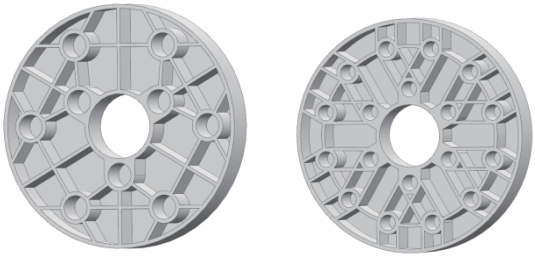
(b) 18点支撑
(b) Eighteen-point support

图 5 主镜的拓扑优化结果

Fig. 5 Topology optimization results of primary mirror

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由拓扑优化结果可知: 为保证主镜具有足够高的强度, 同时减小主镜重量, 应加强浮动区域支撑点间的结构强度, 同时保证浮动区域间以及浮动区域与镜体之间的强度。图 6 给出了拓扑优化后主镜背部结构形式。



(a) 9点支撑
(a) Nine-point support

(b) 18点支撑
(b) Eighteen-point support

图 6　拓扑优化后主镜背部结构形式

Fig. 6　Back structure of primary mirror

经过拓扑优化后, 9 点浮动支撑下的主镜重量为 20.8 kg, 轻量化率为 61.5%, 较传统结构轻量化率提高了 11.5%; 18 点浮动支撑下主镜由于支撑点较多, 结构形式略复杂, 重量为 24.6 kg, 轻量化率为 54.5%; 与传统结构相比, 轻量化率略有提高, 重量略轻。

对上述两种主镜进行激光热畸变分析, 计算结果如图 7 所示。

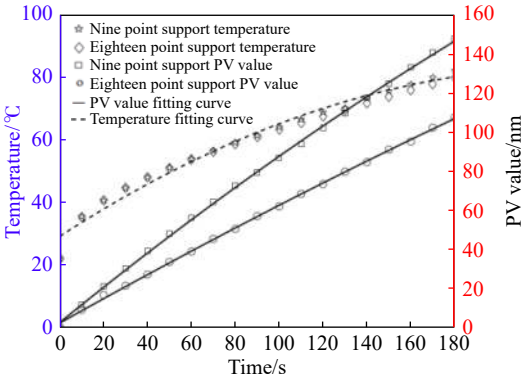
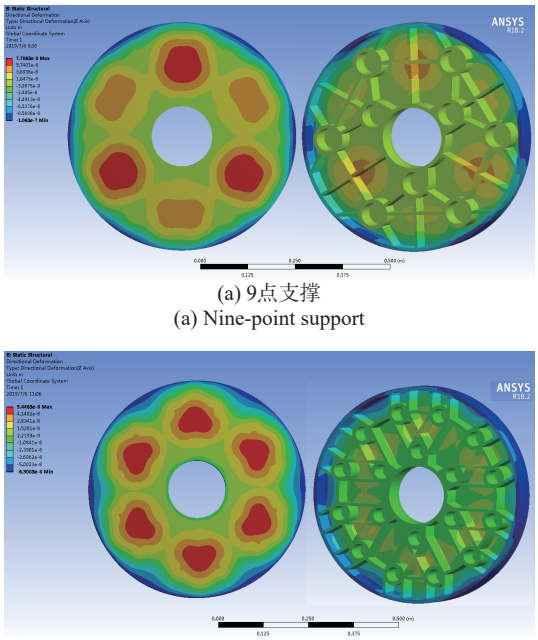


图 7　主镜热畸变仿真结果

Fig. 7　Simulation results of primary mirror thermal deformation

对比图 3 可以发现, 3 种模型下主镜的温升值与温升规律基本相同, 说明强激光作用下主镜的温度场与主镜背部轻量化形式基本无关。对比 P-V 值可以发现, 拓扑优化后 9 点支撑下主镜 P-V 值为 146.5 nm, 18 点支撑下主镜 P-V 值为 106.9 nm, 均优于传统轻量化结构。18 点浮动支撑下主镜的 P-V 值约为 $\lambda/10$, 减小了近 1/3, 优于系统指标。可见, 支撑点的增加可显著提高镜体强度, 减小镜面热畸变。图 8 给出了辐照时间为 3 min 时, 上述两种结构形式下的主镜热变形云图。



(a) 9点支撑
(a) Nine-point support

(b) 18点支撑
(b) Eighteen-point support

图 8　主镜热变形仿真云图

Fig. 8　Simulation cloud chart of primary mirror thermal deformation

由图 8(a)(彩图见期刊电子版)可以看出, 均布的 6 处激光辐照区内热变形量具有不一致性, 这与图 4(b) 的计算结果完全一致, 说明 9 点浮动支撑下主镜热畸变产生的附加相位具有不一致性, 这将影响远场 6 束激光的合束效果。而如图 8(b)(彩图见期刊电子版)所示, 18 点浮动支撑下主镜辐照区内热畸变量具有一致性。可见通过改变主镜的支撑点数目, 使其与激光束数量相匹配, 可减小热畸变所造成的光束质量差异化。综上所述, 18 点支撑的结构形式热畸变量小, 热畸变一致性好, 故本文选用 18 点浮动支撑的主镜结构形式。

3.3　重力、环境适应性及模态分析

由于主镜尺寸和重量较大, 需要进一步对主镜进行重力、环境适应性和模态分析, 以确保主镜性能满足设计要求。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

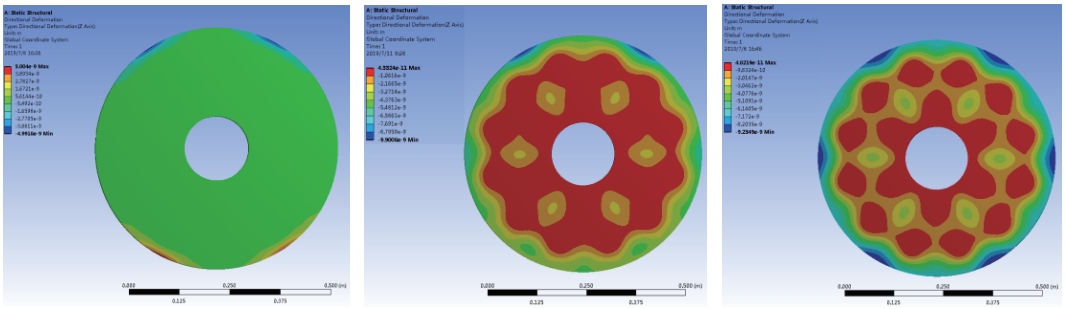
3.3.1 重力分析

考虑到主镜在俯仰方向的工作角度为0°~90°, 计算了俯仰角分别为 0°、45°和 90°时, 3 种不同工况下主镜的重力变形。

工况 1: 俯仰角为 0°, 主镜重力方向垂直于光轴, 沿主镜径向竖直向下, 主镜重力主要由背部支撑元件卸载, 中心轴仅承受较小的径向载荷, 对主镜施加沿径向方向的重力载荷, 并将支撑位置处设为全约束, 经计算主镜 P-V 值为 10 nm。

工况 2: 俯仰角为 45°, 重力方向与光轴成一定角度, 工作状态下主镜多处于此种工况。光轴倾斜时, 重力在径向和轴向都有分量, 主镜重量由背部支撑和中心支撑共同卸载, 中心支撑主要起到定位作用, 承载较小。将支撑位置处设置为全约束, 可得主镜 P-V 值为 10 nm。

工况 3: 俯仰角为 90°时, 重力方向平行于光轴, 重力方向沿主镜轴向竖直向下, 背部支撑元件承受全部主镜重量, 受到压应力作用, 此时主镜 P-V 值为 9.2 nm。图 9(彩图见期刊电子版)给出了三种工况下主镜的重力变形云图。



(a) 工况1 (a) Load case 1　(b) 工况2 (b) Load case 2　(c) 工况3 (c) Load case 3

图 9 3 种工况下主镜重力变形云图

Fig. 9 Gravity deformation cloud chart of primary mirror under three different load cases

由计算结果可知, 不同俯仰角下主镜的 P-V 值基本相同。由重力云图可以看出, 大变形量发生在主镜边缘, 因此, 激光加载区 P-V 值要优于 10 nm。

3.3.2 环境适应性分析

主镜口径越大, 由环境温度变化导致的镜面变形越显著。依据系统要求, 主镜工作温度范围为−20 ℃~60 ℃, 利用有限元模型计算了系统稳态温度为 22 ℃, 俯仰角为 0°, 1 g 重力加速度下, 不同环境温度的主镜镜面变形, 计算结果如图 10 所示。

由图 10 可以发现: 随着系统温差值增大, 主镜 P-V 值逐渐增大; 与激光热效应、重力因素相比, 环境温度对空间合束主镜的影响较大; 环境温度为−20 ℃ 时, 主镜变形量最大, 此时镜面 P-V 值为 94 nm。图 11 给出环境温度为−20 ℃ 和 60 ℃ 时的主镜面形云图。

从图中可以看出: 与室温时相比, 主镜在低温−20 ℃ 时整体发生冷收缩现象, 在高温 60 ℃ 时整体发生热膨胀现象; 在背部支撑作用下, 支撑点处变形量小于其他区域; 高、低温下主镜面形呈现相反的面形规律。值得注意的是高温、低温环境下除了会产生镜面畸变外, 镜体还发生整体“平移”现象, 这会对远场聚焦光束产生离焦像差, 因此需要进行温度补偿设计。

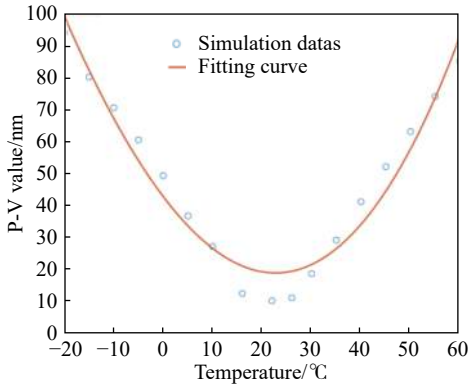
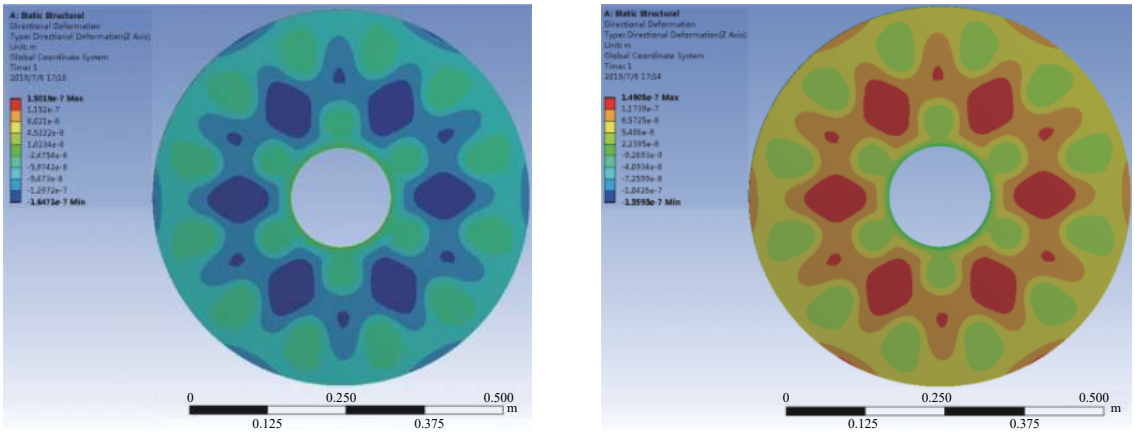


图 10 不同环境温度下主镜镜面 P-V 值

Fig. 10 P-V values of primary mirror in different ambient temperatures

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)　　(b)

图 11　环境温度为 (a) −20 ℃ 和 (b) 60 ℃ 时主镜面形云图

Fig. 11　Thermal deformation cloud chart of primary mirror at −20 ℃ (a) and 60 ℃ (b)

3.4　主镜模态分析

模态分析主要用于确定结构或机器部件的振动特性, 通过它可以确定固有频率、振型, 使结构避免共振或以特定频率振动。当主镜自身的固有频率接近或等于外界的激扰频率时, 会使整个结构发生共振, 从而造成疲劳破坏, 因此提高结构的基频以避开外界的扰频显得非常重要。

系统要求主镜基频应大于 100 Hz。对主镜模态进行分析, 设定背部支撑位置为全约束, 计算得主镜基频为 3 685.6 Hz, 满足系统要求。

4　结　论

针对激光空间合束系统, 利用拓扑优化结合经验公式开展对口径为 600 mm 的主镜进行结构优化。研究结果表明: 镜面表面温度与主镜结构形式基本无关, 主要与辐照激光功率密度和镜体材料有关; 镜体的结构形式对主镜镜面 P-V 值影响较大, 增强辐照区结构强度可有效抑制镜面热变形; 对于六光合束主镜, 九点浮动支撑结构主镜易造成镜面热变形量的不一致, 而增加支撑点数可抑制不一致性, 减小镜面热畸变。重力、环境温度和模态分析表明: 环境温度的改变对主镜面形影响较大, 环境温度为−20 ℃ 时, 镜面变形 P-V 值为 94 nm, 镜面平移量值约为 71 nm。

参考文献:

[1]　FAN T Y. Laser beam combining for high-power, high-radiance sources[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2005, 11(3): 567-577.

[2]　LEGER J R, NILSSON J, HUIGNARD J P, *et al*.. Introduction to the issue on laser beam combining and fiber laser systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2009, 15(2): 237-239.

[3]　刘泽金, 周朴, 王小林, 等. 激光相干合成的历史、现状与发展趋势(邀请论文)[J]. 中国激光, 2010, 37(9): 2221-2234.
LIU Z J, ZHOU P, WANG X L, *et al*.. The history, development and tend of coherent combining of laser beams[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(9): 2221-2234. (in Chinese)

[4]　MADASAMY P, LOFTUS T, THOMAS A, *et al*.. Comparison of spectral beam combining approaches for high power fiber laser systems[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6952: 695207.

[5]　SPRANGLE P, TING A, PENANO J, *et al*.. Incoherent combining and atmospheric propagation of high-power fiber lasers for directed-energy applications[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(2): 138-148.

[6]　王富国, 杨洪波, 赵文兴, 等. 1.2 m SiC主镜轻量化设计与分析[J]. 光学 精密工程, 2009, 17(1): 85-91.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

WANG F G, YANG H B, ZHAO W X, *et al*.. Lightweight design and analysis of a 1.2 m SiC primary mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(1): 85-91. (in Chinese)

[7] 王富国, 杨洪波, 杨飞, 等. 大口径主镜轴向支撑点位置优化分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 877-880.
WANG F G, YANG H B, YANG F, *et al*.. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6): 877-880. (in Chinese)

[8] 宫辉, 连华东. 大口径SiC反射镜背部筋板布局设计研究[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(2): 56-61, 69.
GONG H, LIAN H D. Study on design of back ribs for large-aperture SiC mirror[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(2): 56-61, 69. (in Chinese)

[9] 包奇红, 沙巍, 陈长征, 等. 中心支撑ϕ610 mm圆形主镜的超轻量化设计[J]. 光子学报, 2016, 45(9): 0912007.
BAO Q H, SHA W, CHEN CH ZH, *et al*.. Ultra-lightweight design of ϕ610 mm circular primary mirror supported in centre[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(9): 0912007. (in Chinese)

[10] 王克军. 天基大口径反射镜轻量化设计及复合支撑技术研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2016.
WANG K J. Research on the lightweight design and compound support of the large-aperture mirror for space-based telescope[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)

[11] 汤伟, 郭劲, 邵俊峰, 等. 激光重频对脉冲非稳腔TEA CO_2激光远场传输特性的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2380-2385.
TANG W, GUO J, SHAO J F, *et al*.. Analysis of far-field characteristics with repetition frequency of TEA CO_2 laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2380-2385. (in Chinese)

[12] 伞晓刚, 孙宁, 卓仁善, 等. 大口径光电经纬仪主反射镜支撑结构设计[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(12): 3111-3117.
SAN X G, SUN N, ZHUO R SH, *et al*.. Design of supporting structure for primary mirror of large aperture theodolite[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(12): 3111-3117. (in Chinese)

作者简介：

汤　伟 (1985—), 男, 黑龙江绥棱县人, 博士, 助理研究员, 2014 年毕业于中国科学院大学, 获得博士学位, 主要从事高能激光系统光机结构设计及激光辐照效应方面的研究。E-mail: twei222@163.com

刘　扬 (1988—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 主要从事对流传热领域研究。E-mail: Liuyangdk@ciomp.ac.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net