

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209373

高功率激光合束器工作可靠性能评估方法研究^{*}

田 晓^{1,2}, 李 奔², 白 杨², 康宇栋¹, 胡子豪¹

(1. 西安航空学院理学院 陕西西安 710077; 2. 西北大学光子学与光子技术研究所 陕西西安 710127)

摘 要:为降低高功率激光在单根光纤中的传输风险,提出基于多光纤传输的激光非相干空间合束 19×1 圆斑合束器。基于“内外同心圆+中心”同轴排列方式,采用光线追迹法进行合束器的光学设计,同时为实现合束器长期运行可靠性评估,基于多激光束同步照射光学元件的体吸收模型,采用有限元方法对合束器内部透镜的温度、热畸变和热应力等进行研究。结果表明,在 10 kW 激光照射 30 mins 下,合束器内部透镜的最高温度为 381.11 K,远低于熔融石英 1 900 K 的软化点温度,热畸变相关的最大光圈数为 0.07,远小于 1 个光圈数的透镜加工公差,热应力最大值为 14.02 MPa,小于熔融石英 4.5 GPa 的屈服应力。此外实验测得合束器输出总功率可达 10.43 kW。本研究对评价其他高功率激光系统的长期运行可靠性提供了有效的方法参考。

关键词: 高功率激光;激光合束器;多激光束体热源;有限元分析;热力学特性

中图分类号: TH744 TN248 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.20

Research on evaluation method of high power laser beam combiner working reliability

Tian Xiao^{1,2}, Li Ben², Bai Yang², Kang Yudong¹, Hu Zihao¹

(1. School of Science, Xi'an Aeronautical Institute, Xi'an 710077, China;

2. Institute of Photonics & Photon-Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: To reduce the transmission risk of high-power laser in a single fiber, a 19×1 incoherent space laser beam combiner with circular spot based on multiple optical fiber transmission was presented. The coaxial close arrangement based on “inner and outer concentric circles + center” is applied in the optical design of the combiner, and the lenses parameters of the combiner are obtained by ray tracing method. Simultaneously, to evaluate the long-term operation reliability of the 19×1 laser beam combiner accurately, the coupled thermo-mechanical characteristics of all optics in the beam combiner is analyzed, to clarify the distributions and evolution laws of temperature field and thermal stress field of optics by using the finite element method (FEM). The multi-beam laser volumetric heat source model is established based on the overall heat source distribution of 19 laser beams synchronously transmitted optical lenses. Then, the temperature field, thermal displacement and stress of optics are simulated. Results show under the irradiation of 10 kW laser for 30 minutes, the temperature of all optical lenses in the beam combiner with the maximum of 381.11 K is far lower than the softening temperature of 1 900 K of the fused silica material. The thermal deformation with the maximum corresponding aperture number of 0.07 is within the design tolerance, and stress with the maximum of 14.02 MPa is less than the yield stress of 4.5 GPa of the fused silica. In addition, the total laser power output by the beam combiner can reach 10.43 kW. The study provides an effective method reference for evaluating the long-term operation reliability of other high-power laser source.

Keywords: high power laser; laser beam combiner; multi-beam laser volumetric heat source; finite element method; thermal-mechanical characteristics

收稿日期: 2022-03-02 Received Date: 2022-03-02

^{*} 基金项目: 陕西省教育厅服务地方专项计划项目 (19JC040)、陕西省省重点研发计划项目 (2020GY-118)、国家重点研发计划项目 (2017YFB0405102) 资助

0 引 言

随着高功率激光在工业、航空航天、船舶、军事装备等诸多领域应用的不断拓展^[1-5],对激光功率提出了更高的要求。一方面不断提高单台激光器的输出功率,另一方面利用合束技术提升激光的总功率^[6-8]。近年来由于合束效率高、成本低、可靠性高等特点,非相干空间合束成为获取超高功率激光的研究热点之一。然而,基于非相干空间技术的激光合束系统(以下简称合束器)使用大量光学元件,光学元件会对激光能量产生一定的热吸收。随着激光功率的进一步提升,大量热积累引发的热形变极易造成光学元件内部产生热熔、应力断裂等安全性问题,给合束器的安全运行带来风险^[9-12]。虽然通过风冷、水冷及半导体致冷等技术^[13-15]可减小该不利影响,但增加了合束器的复杂性,也提高了制造成本。因此,获取合束器内部光学元件的热力学性能并对其稳定性和可靠性进行有效评估,是研制超高功率的激光合束器的一项十分重要工作,也是不可或缺的一个重要环节。

随着计算方法的不断更新优化,有限元数值仿真技术得到快速发展^[16-17],已被成功应用于高功率激光系统内部光学元件的温度场、热畸变、热应力等热力学性能的模拟仿真。北京应用物理与计算数学研究所胡鹏等^[18]以激光对光学元件的面吸收作为热源,利用有限元方法分析了激光作用下 Si 反射镜和 SiO₂ 窗口镜的温度。电子科技大学祖小涛和西南科技大学蒋勇等基于激光体热源的有限元热力学模型,研究了单束 CO₂ 高功率激光对熔融石英表面损伤部位进行局部再熔合^[19]。在上述研究中,文献[18]将激光简化为表面热源研究其对光学元件的辐照作用,忽略了光学元件内部对激光能量的吸收。光学透镜材料对透射激光束的吸收是影响透镜热力学性能的主要因素之一,因此考虑材料内部的热吸收是非常必要的。文献[19]将照射在材料上的激光作体热源处理,但是热源仅来自单束激光。利用激光束作为体热源,对超高功率多光束传输光学器件进行热力学分析的报道很少,这对于长时间受激光照射的高功率合束器的性能评估至关重要。

课题组提出基于多束光纤传输的激光非相干空间合束的 19×1 圆斑合束器,该型合束器可应用于工业大面积、快速的金属表面热处理领域。在对合束器的物理结构进行设计,并针对合束器长期运行稳定性和可靠性判断,考虑合束器内部光学元件对 19 束激光的体吸收,建立多激光束同步照射光学元件的体吸收模型,采用有限元方法研究光学元件的热力学性能,明确其在 10 kW 激光长时间照射下的温度场和热应力场的分布和演变规律。

并结合实验测量,对所建立的热分析模型的准确性进行了验证,从而完成了合束器长时间运行的可靠性评估。

1 圆斑合束器的结构设计

19×1 非相干空间合束原理如图 1(a)所示,按照“内外同心圆+中心”的同轴排列方式^[20],并考虑激光能量分布的均匀性,19 束激光被应用于合束器的设计与实现。激光由波长为 972 nm 的近红外半导体激光器产生,每束激光的功率均超过 600 W,并在相同参数的光纤(直径 d : 440 μm ,数值孔径 N. A.: 0.22)内传输。合束器包含 19 个准直单元 (beam collimation unit, BCU) 及 1 个合束单元 (space beam combination unit, SBCU),分别用于准直传输光纤输出的发散激光束,合束 19 个相互平行的准直光束。

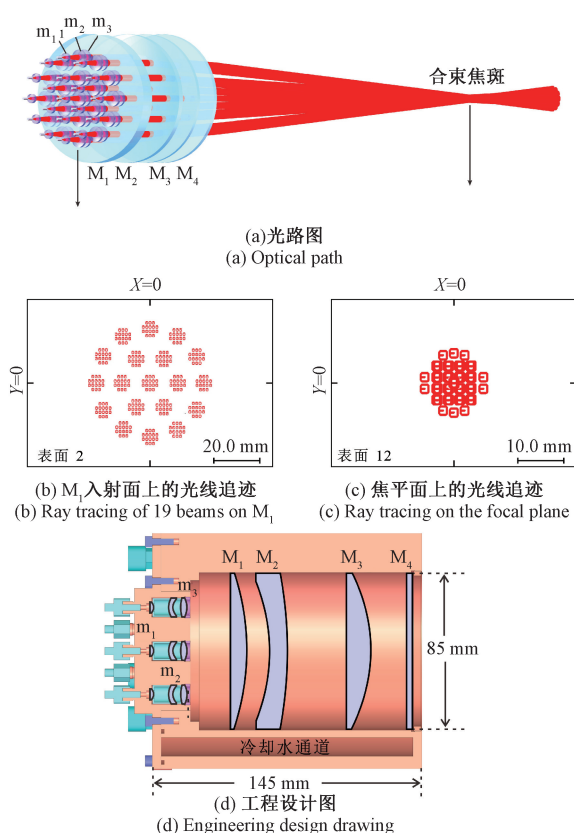


图 1 19×1 非相空间干合束

Fig. 1 Schematic diagram of 19×1 incoherent spatial laser beam combination

为尽量减小合束器的通光孔径,在保证其结构强度的前提下,相邻 BCU 的中心距离被压缩至 15 mm;每个 BCU 均由 m_1 、 m_2 和 m_3 三个球面透镜构成。通过 BCU 后,传输光纤输出的发散激光束被转换成光斑半径为 3.5 mm、发散半径为 14.8 mrad 的准直激光束。基于光线追迹法,对 SBCU 中透镜的数量、尺寸、通光面曲率半

径、相邻间距等参数实施优化设计,从而使 19 束彼此平行的准直光束经过共用的 SBCU 实现空间同步非相干聚焦合束,满足在 200 mm 的合束长度内形成合束焦斑直径为 15 mm,合束功率大于 10 kW、单一圆形光束形态合束激光束的应用技术需求。图 1(b) 和(c) 分别表示 SBCU 中第 1 个合束透镜 M_1 入射面和合束焦斑面上的激光光斑的光线追迹分布。SBCU 由 M_1 、 M_2 、 M_3 这 3 个球面透镜和 1 个平面窗口镜 M_4 组成。沿合束方向,光纤输出端面至透镜 M_4 ,相邻的透镜彼此间距分别为 5.41、9.62、4.09、21.57、12.22、30.34 和 21.48 mm。BCU 和 SBCU 中透镜参数如表 1 所示。

表 1 合束器内光学元件的参数

Table 1 Parameters of all optics in the 19×1 combiner

透镜	曲率半径	中心厚度/mm	直径/mm
准直单元	m_1 入: -75.01 出: +5.28	2.02	7.00
	m_2 入: +20.02 出: -11.70	1.51	12.00
	m_3 入: +30.02 出: +15.70	3.58	12.00
合束单元	M_1 入: ∞ 出: +400.32	8.52	85.00
	M_2 入: -156.16 出: +160.11	10.20	85.00
	M_3 入: ∞ 出: +224.40	12.48	85.00
	M_4 入: ∞ 出: ∞	3.00	85.00

沿合束方向,将合束激光的焦斑位置设定为参考 0 点,图 2(a) ~ (g) 展现出使用 TracePro 软件模拟得到的合束光斑与合束焦斑之间的相对距离 Δz 分别为 -105、-100、-50、0、+50、+100 和 +105 mm 时的合束激光光斑能量分布。由图 2(a) 和 (g) 可以看出,对应的合束光斑能量分布呈现离散分布的特征。而图 2(b) ~ (f) 展示出的合束激光光斑的能量分布呈现单个高斯激光束的圆形光斑横截面能量分布,其中图 2(d) 表示合束焦斑位置处合束光斑的尺寸,可以看出该值接近 15 mm 的合束焦斑理论设计值。以上分析表明,在 -100 ~ +100 mm 的距离 (图 2(b) ~ (f) 对应合束光斑之间的距离) 内,即在 200 mm 的合束长度内,合束激光呈单一圆形光束形态。

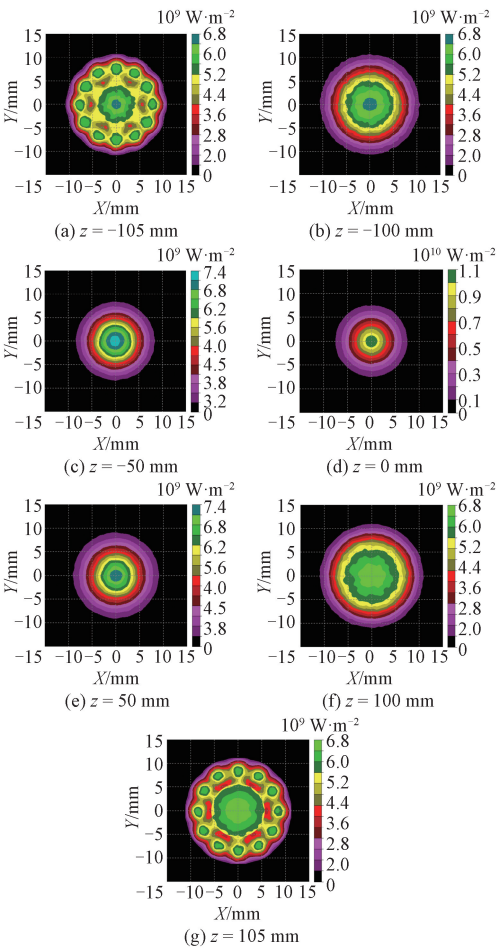


图 2 合束激光光斑能量分布

Fig. 2 Distributions of combined laser energy in the beam combining length

2 合束器热分析理论

2.1 合束激光总体热源

总功率超过 10 kW 的 19 束激光通过 SBCU 中 $M_1 \sim M_4$ 透镜时,激光能量因透镜材料吸收而在其内部形成体热源 Q 。假定激光束沿 Z 轴进行空间非相干合束。当参与合束的 19 束激光束同时作用于 SBCU 透镜时,产生的热源 Q 表示为:

$$Q = \sum_i^{19} Q_i = \sum_i^{19} \alpha \frac{2(1-R)P}{\pi\omega^2} \exp(-\alpha z) \exp\left(-2\left(\frac{(x+\Delta x_i)^2}{\omega^2} + \frac{(y+\Delta y_i)^2}{\omega^2}\right)\right) \quad (1)$$

式中: Q_i 为第 i 束激光被光学材料吸收的激光能量, P 为作用于透镜表面的单束激光功率, Δx_i 和 Δy_i 分别表示相对坐标参考原点,第 i 束激光在透镜作用面上的位置坐标, ω 表示激光 $1/e$ 半径。SBCU 中包含透镜 M_1 、 M_2 、 M_3

和 M_4 , 因此到达每个透镜表面的激光束具有相应的 P , $\Delta x_i, \Delta y_i$ 及 ω 。 $\alpha=0.105/\text{m}$ 、 $R=0.4\%$ 分别为熔融石英材料在 972 nm 波长处的热吸收系数、反射率。

19 个光斑中心在透镜入射面上的坐标如图 3 所示。以中心光斑(0, 0)作为坐标参考原点, 排布在内、外圆环上的光斑中心与参考原点的间距分别为 L 和 $2L$, 内、外圆环上相邻两个光斑中心对参考原点的夹角分别为 $\pi/3$ 和 $\pi/6$ 。

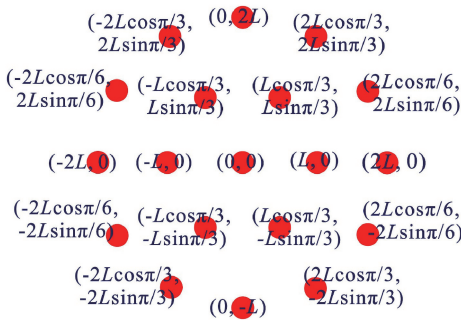


图 3 合束单元中 19 束激光的光斑排列示意图

Fig. 3 Diagram of concentric circle arrangement of 19 laser spots in SBCU

基于 BCU 准直光束特征、合束器结构尺寸和 800 mm 的合束焦距, 得到单根激光入射至 SBCU 中 $M_1 \sim M_4$ 透镜表面的光斑半径相应为 3.50、3.17、2.11 和 1.51 mm, 以及对应透镜入射面上任意相邻两束激光的光轴间距 L 分别为 15.0、13.9、12.8 和 11.3 mm, 结合式 (1) 最终得到 19 束激光入射至 $M_1 \sim M_4$ 透镜表面的实际热源表示。研究中, 同一透镜前后通光面上的光轴间距及激光光斑半径的变化忽略不计。

2.2 热分析模型

热源 Q 导致透镜内部温度变化迅速, 其温度分析属瞬态热传导问题。考虑透镜材料的物理性质随时间变化及材料的各项异性梯度结构, 热传导控制方程组表述为:

∂(ρC_p(T)T)/∂t = Q + ∇(K(T)∇T) (2)

T(x,y,z,0)_{t=0} = T₀ (3)

-K ∂T/∂u = h(T - T₀) + σε(T⁴ - T₀⁴) (4)

式中: ∇ 为空间坐标的梯度算子, Q 是求解域总体热源, T 为材料温度场, $T_0=293.15\text{ K}$ 为环境温度, t 为激光作用时间。 ρ 、 C_p 和 K 为材料的密度, 热容和热传导系数。 σ 和 ε 为玻尔兹曼常数和材料的热辐射系数, h 为材料与周围环境的热交换系数, u 是材料表面外法向矢量大小。

合束器内部所有透镜侧面与套筒之间有 10 μm 左右的空隙, 故透镜通光表面和侧面与周围环境有热交换, 空气热交换系数 h 取 $10\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ^[21], 透镜的 20℃ 外部

空气环境温度由循环水冷器保证。利用有限元分析软件, 首先对表 1 中透镜 $M_1 \sim M_4$ 的几何模型进行网格划分, 综合考虑有限元分析计算的精确性和计算速度, 采用双精度网格划分, 在激光作用区域选取较细密网格, 而在非激光作用区采用较稀疏网格。然后利用 2.1 小节的热源, 边界条件(包括表面空气热对流、表面热辐射以及边缘固定约束等)和表 2 的材料参数, 将式 (1) 置入方程组式 (2) ~ (4), 采用有限元方法求解透镜 $M_1 \sim M_4$ 对应的温度分布, 并以温度结果为热载荷, 耦合仿真应力场。

表 2 熔石英材料的物理性能
Table 2 Physical properties of fused silica material

参数	值	单位
密度	2 200	kg/m ³
热容	35.94+3.37T-0.004 1T ² +2.58 ×10 ⁻⁶ T ³ -8.09×10 ⁻¹⁰ T ⁴ +9.90×10 ⁻¹⁴ T ⁵	J/(kg·K)
热传导	0.98+1.12×10 ⁻³ T	W/(m·K)
热膨胀	5.18×10 ⁻⁷	1/K
热辐射	0.8	
泊松比	0.17	
杨氏模量	7.56×10 ¹⁰	Pa
体积模量	3.87×10 ¹⁰	Pa
剪切模量	3.19×10 ¹⁰	Pa

3 合束器热力学分析

3.1 温度场分布

设定单台 972 nm 激光器输出功率为 600 W, 由 19 根光束形成的合束激光照射 30 min 时, SBCU 中透镜 $M_1 \sim M_4$ 的两个通光面及剖面上的温度场如图 4(a) ~ (d) 所示。

由图 4 可知, 总体热源 Q 导致的每个透镜通光面上的温度分布与合束光斑分布规律基本一致, 近似呈圆形。每个透镜镜体中心处的温度最高。沿合束方向($M_1 \rightarrow M_4$), 19 束激光整体照射体积因聚焦合束而逐渐被压缩, 不断增强的激光总功率体密度造成中心厚度越大的透镜对激光能量的体吸收越严重, 而边缘厚度越小的透镜沿径向的热传导速率越低。如表 1 和图 4 所示, 中心厚度与镜体最高温度呈现出对应关系, 中心厚度最大的 M_3 透镜具有 381.11 K 的最大温度, 其次为 M_2 、 M_1 和 M_4 。图 4(e) 表示 $M_1 \sim M_4$ 的最高温度随激光照射时间的变化。1 600 s 后所有透镜的最高温度趋于稳定, 并均远低于制造透镜所用熔石英的 1 900 K 软化温度^[22]。

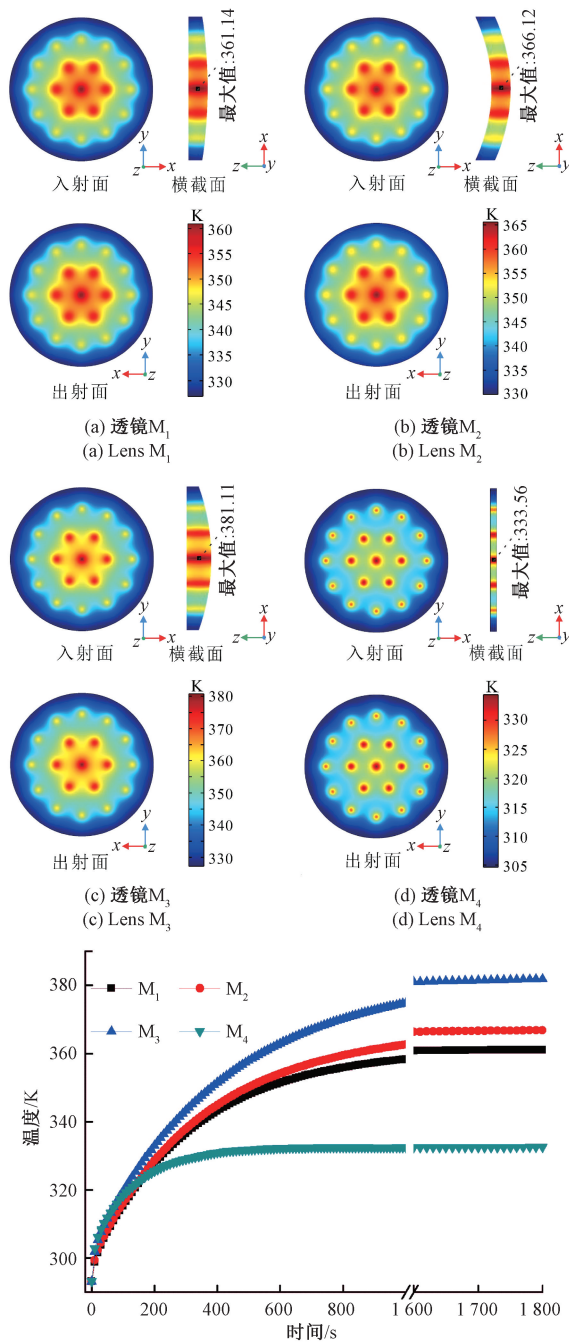


图 4 合束单元透镜的温度

Fig. 4 Temperature field of SBCU lenses

3.2 热畸变

基于温度场结果得到的 $M_1 \sim M_4$ 透镜的通光面和剖面的热畸变分布以及最大畸变量受激光照射时长的影响规律如图 5 所示。每个透镜的像方主平面均位于其出射面的右侧或重叠的结构特点导致其内部的热变形将沿着 Z 轴方向传递。同时受到最高温度点均处于镜体中心位

置的影响,每个透镜的最大热变形量均分布于其出射面的中心区域。由于 M_2 透镜的边缘厚度大于其中心厚度且质心未在其镜体内部,其镜体边缘因冷却产生的体收缩量大于其他透镜。在中心最高温度相差不大的情况下, M_2 透镜的 $2.72 \mu\text{m}$ 最大热畸变量是 4 个透镜中最大的,其次为 M_3 、 M_1 和 M_4 。受透镜最高温度趋于稳定的影响,在 1 600 s 后各透镜的热畸变逐渐不变。

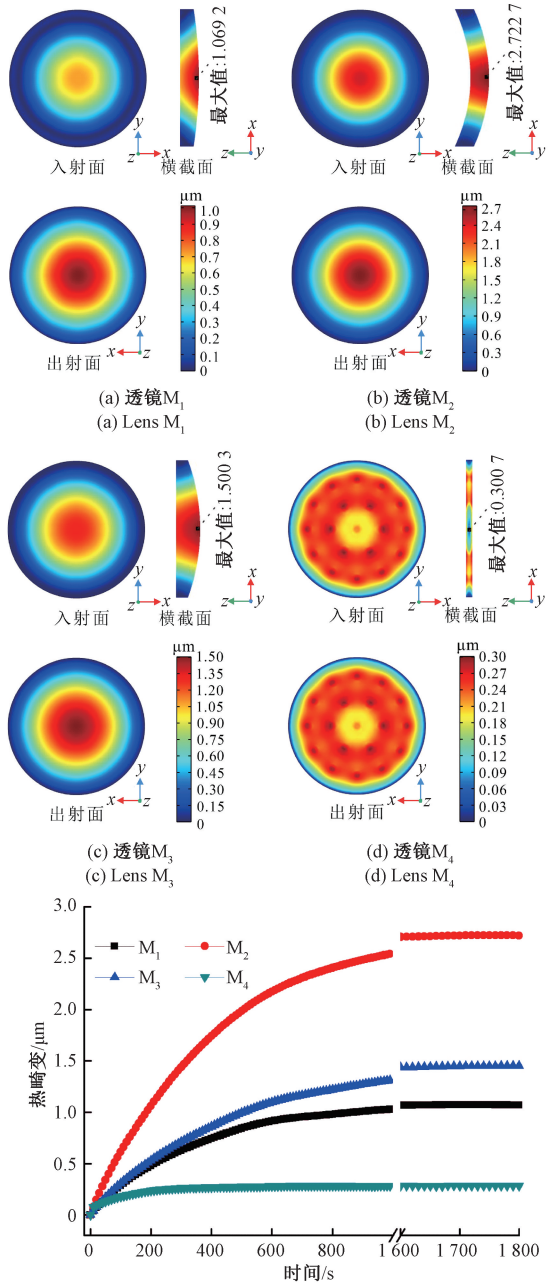


图 5 合束单元透镜的热畸变

Fig. 5 Thermal distortion of SBCU lenses

为更直接地评估热畸变对合束器长时间运行性能的影响,采用 Zernike 多项式拟合方法获得透镜通光面曲率半径的热形变值 ΔR_a 并表示为光圈数 $G^{[23]}$,作为热畸变对合束影响的评价依据。

$$G = \left(\frac{D_i}{2R_a}\right)^2 \times \frac{\Delta R_a}{\lambda}$$

(5)

式中: D_i 和 R_a 相应表示发生热畸变前透镜的直径和通光面曲率半径,激光波长 $\lambda=972\text{ nm}$ 。

计算结果如表 3 所示。在 10 kW 激光长时间照射后,SBCU 的 4 个透镜中 M_2 透镜入射面的 G 值最大,但 0.07 的最大 G 值远小于 1 个光圈数的透镜传统加工公差要求。说明 10 kW 激光长时间照射后 $M_1\sim M_4$ 透镜产生的热畸变,并不会影响合束器的合束质量。

3.3 热应力

图 6 表示 $M_1\sim M_4$ 透镜的 Von-Mises 等效热应力分布及最大热应力随激光作用时长的影响规律。根据塑性力学理论,透镜内部的热应力将向着其边缘固定约束位置传递。 $M_1\sim M_3$ 透镜的入射面为凸面,热应力迅速向镜体边缘传递,并在镜体边缘处形成热应力积累,最大热应力均沿镜体边缘形成圆形对称分布。而 M_4 透镜为平面镜,其中心厚度与边缘厚度相同的结构特点造成热应力向镜体边缘传递速度较慢,造成在其镜体中心形成热应力积累并形成最大热应力。如图 6(a)~(d) 所示, $M_1\sim M_4$ 透镜中最大热应力值与其对应的热畸变光圈数有关, G 值越大则热应力越大。 $M_1\sim M_4$ 透镜中,具有最大热畸变光圈束的 M_2 透镜边缘处形成 11.45 MPa 的最大热应力,其次为 M_3 、 M_1 、 M_4 ,并且在 1 600 s 后各透镜的最大热应力趋于稳定。而 11.45 MPa 的最大等效热应力远小于熔融石英材料 4.5 GPa 的屈服应力^[24]。

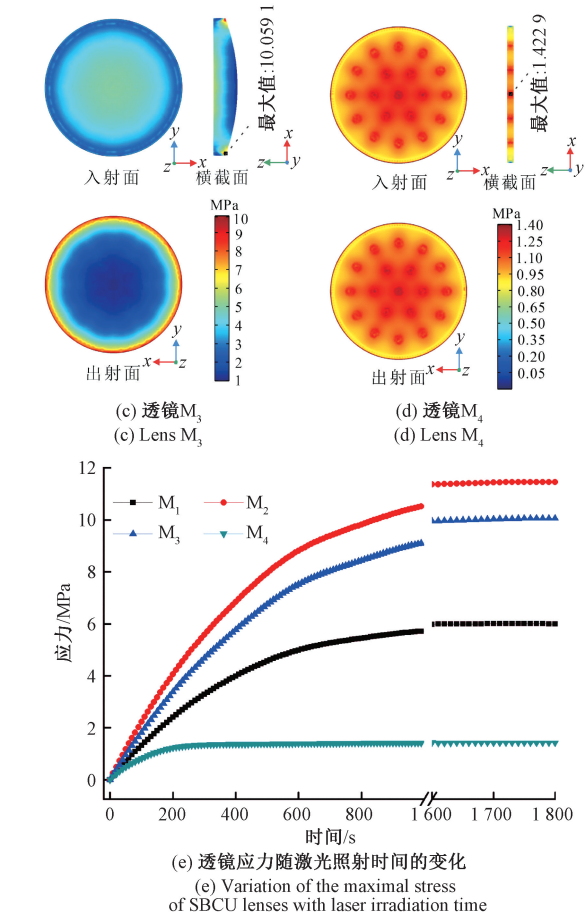


图 6 合束单元透镜的热应力
Fig. 6 Thermal stress of SBCU lenses

此外,为全面验证合束器能够在 10 kW 高功率激光照射下的长期安全运行,基于单束激光体吸收模型(令式(1)中 $i=1$),对 BCU 中 m_1 、 m_2 和 m_3 透镜的耦合热力性能进行分析,结果如表 3 所示。可以看出,BCU 中的 3 个透镜的最大温差、最大热畸变、最大热应力都在安全范围内。

表 3 合束器内部所有透镜的热力耦合分析结果
Table 3 Coupled thermal-mechanical results of all optics in the combiner

透镜		最大温度	最大热畸	最大应力/	光圈数
		差/K	变/ μm	MPa	
准直单元	m_1	10.10	0.23	14.02	0.01
	m_2	8.55	0.13	3.37	0.01
	m_3	7.93	0.11	7.68	0.01
合束单元	M_1	64.89	1.07	5.31	0.03
	M_2	69.97	2.72	11.45	0.07
	M_3	84.86	1.50	10.06	0.04
	M_4	42.99	0.30	1.50	0.01

4 合束器实验结果

合束器如图 7(a) 所示, 19 个 BCU 和 1 个 SBCU 组成的结构整体呈“圆柱”形, 通光孔径为 85 mm, 外径为 145 mm。合束器的主体材料为具有高导热性和良好机械性能的 H85 黄铜, 外部采用 20℃ 环形水冷却。当 19 台 972 nm 激光器同步工作, 且每台激光泵浦电流均为 38 A 时, 在 27℃ 室温环境下, 实验测得输出的合束激光功率为 10.43 kW, 功率不稳定性小于 $\pm 1.45\%$ 。在合束激光焦斑位置附近放置一块厚度为 10 mm 的钢板, 进行了时长为 3 s 的激光射孔实验, 结果可用于近似表征合束焦斑尺寸, 如图 7(b) 所示。钢板的射孔尺寸约为 15 mm, 并且射孔表面较平整, 说明实验结果达到了预期技术指标。也说明合束激光能量分布的均匀性。

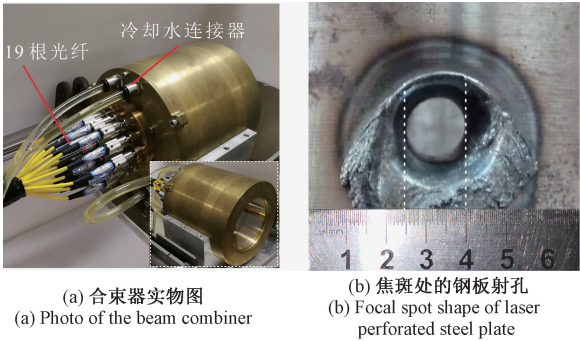


图 7 19×1 圆斑激光合束器

Fig. 7 19×1 laser beam combiner with circular spot

同时, 为验证所建立的有限元热分析模型的准确性, 对合束器中唯一可观测光学元件, 即合束器的窗口保护镜 M_4 , 在激光不同照射时长下的温度参量, 通过热像仪进行测量。图 8(a) ~ (d) 展示在 27℃ 室温环境下, 激光照射时长分别为 50、200、400、1 600 和 1 800 s 时的测量

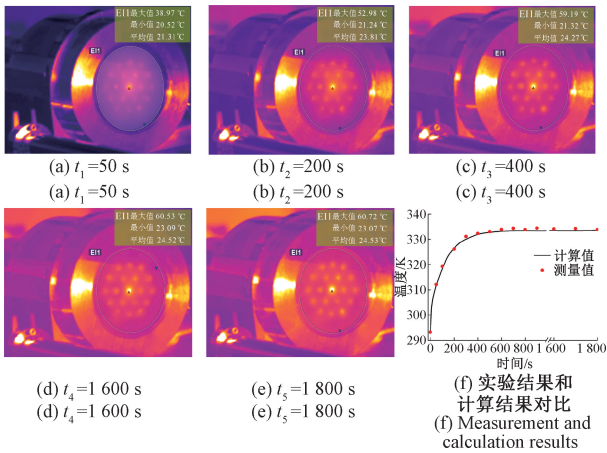


图 8 M_4 透镜出射面中心的温度

Fig. 8 Temperature on the lens M_4 exit surface center

照片。图 8(e) 则表示最高温度的测量值和模拟值的对比, 由图可知两者始终保持较好的一致性, 且最高温度约在 800 s 后基本保持不变。研究结果说明所建立的有限元分析模型能够较真实反映描述合束器内光学元件的热力学特性, 并且充分验证了合束器在总功率超过 10 kW 的激光照射下能够长期稳定运行。

5 结 论

本文提出了 19×1 圆斑非相干空间激光合束器及其长期运行可靠性的精确评估方法。建立 19 束 972 nm 近红外激光束参与空间非相干合束时的体吸收有限元热分析模型, 模拟合束器内部光学透镜长时间工作时的温度、热畸变和热应力分布及随激光照射时间的变化规律, 实现了合束器的工作稳定性和可靠性评估。通过实验测得 19 台 972 nm 激光器同步工作时, 合束器输出功率可达 10 kW 以上。此外, 测量合束器窗口保护镜的温度, 该实验测量值和仿真值随激光照射时间变化的一致性表明建立的分析模型的精确性, 因此研究结果可较准确地反映了合束器内部透镜的热力学特性。本研究方法能够有效地实现合束器长期工作性能的评价, 此外在研究其它类型的超高功率激光系统的可靠性方面具有一定借鉴意义。

参考文献

[1] JOHN M, KALVALA P R, MISRA M, et al. Peening techniques for surface modification: Processes, properties, and applications [J]. Materials, 2021, 14(14): 3841.

[2] 宋薇, 刘勘, 章亚男, 等. 高功率激光装置中靶的进化式位姿检测 [J], 仪器仪表学报, 2015, 36 (1): 215-223.

SONG W, LIU X, ZHANG Y N, et al. Evolutionary target pose measurement in high power laser device [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36 (1): 215-223.

[3] 解宇飞, 刘洪伟, 胡永祥. 船舶板材激光除锈工艺参数确定方法研究 [J]. 中国激光. 2016, 43 (4): 0403008.

XIE Y F, LIU H W, HU Y X. Determining process parameters for laser derusting of ship steel plates [J]. Chinses Journal of Lasers, 2016, 43(4): 0403008.

[4] PHIPPS C, BIRKAN M, BOHN W, et al. Review:

- Laser-ablation propulsion [J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(4): 609-637.
- [5] SPRANGLE P, HAFIZI B, TING A, et al. High-power lasers for directed-energy applications [J]. Applied Optics, 2015, 54(31): F201-F209.
- [6] 韩金樑,张俊,单肖楠,等. 基于半导体激光合束技术的高功率加热光源 [J]. 光学学报, 2021, 41(22): 131-136.
- HAN J L, ZHANG J, SHAN X N, et al. High power heating light source based on semiconductor laser beam combination technology [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(22): 131-136.
- [7] ZHENG Y, YANG Y F, WANG J H, et al. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber superfluorescent sources and their dispersion compensation [J]. Optics Express, 2016, 24(11): 12063-12071.
- [8] YANG G Q, LIU L S, JIANG Z H, et al. Incoherent beam combining using fast steering mirrors [J]. Journal of Modern Optics, 2017, 64(3): 251-258.
- [9] 张小民,胡东霞,许党朋,等. 浅论强激光系统的物理受限问题[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 18-38,2.
- ZHANG X M, HU D X, XU D P, et al. Physical limitations of high-power, high energy lasers [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 18-38,2.
- [10] 王飞. 激光脉冲对光学材料损伤的热特性研究[D]. 苏州:苏州大学: 2019: 2-10.
- WANG F. Study on thermal characteristics of laser induced damage in optical materials [D] Suzhou: Soochow University, 2019: 2-10.
- [11] PENANO J, SPRANGLE P, TING A, et al. Optical quality of high-power laser beams in lenses[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009, 26(3): 503-510.
- [12] WHITE J O, VASILYEV A, CAHILL J P, et al. Suppression of stimulated Brillouin scattering in optical fibers using a linearly chirped diode laser [J]. Optics Express, 2012, 20(12): 15872-15881.
- [13] 柳建,李树民,赵杰,等. 镜面热变形及吹气流场对光束的联合影响[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2032-2038.
- LIU J, LI SH M, ZHAO J, et al. Combined influence of mirror thermal deformation and blowing on beam propagation [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2032-2038.
- [14] 肖凯博,郑建刚,蒋新颖,等. 高重复频率水冷 Nd:YAG 激活镜放大器的温度特性 [J]. 物理学报, 2021, 7(3): 138-147.
- XIAO K B, ZHENG J G, JIANG X Y, et al. Temperature characteristics of high repetition rate water-cooled Nd: YAG active mirror amplifier [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 7(3): 138-147.
- [15] 聂山钧,郭劲,邵俊峰,等. 半导体制冷对镜面热变形影响的数值研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 233-238.
- NIE SH J, GUO J, SHAO J F, et al. Numerical analysis on the thermal-deformation of semiconductor refrigerated mirror [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 233-238.
- [16] 廖韦韬,王海涛,江奕,等. 基于激光超声体波的轨头内部缺陷检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 221-229.
- LIAO W T, WANG H T, JIANG Y, et al. Research on the internal defect detection method of rail head based on laser ultrasonic body wave [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 221-229.
- [17] 林钰,胡意茹,李茜,等. 复杂环境中海底电缆温度场及载流量模型研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(11): 39-46.
- LIN Y, HU Y R, LI Q, et al. Analysis of submarine cable temperature field and ampacity model in complex environment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(11): 39-46.
- [18] 胡鹏,张建柱. 激光系统中元件热效应时空特性分析[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 129-136.
- HU P, ZHANG J ZH. Analysis of spatio-temporal characters of thermal effect of optical components in laser system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 129-136.
- [19] JIANG Y, HE S B, LIAO W, et al. Theoretical and experimental investigations of localized CO₂ laser-fused silica interactions and thermo-mechanical properties of mitigated sites [J]. Journal of Non-Crystalline Solids,

- 2019, 515: 1-10.
- [20] BAI Y, LEI G Z, CHEN H W, et al. Incoherent space beam combining of fiber-transmitted semiconductor lasers for oil well laser perforation [J]. IEEE Access, 2019, 7: 154457-154465.
- [21] ZHOU Q H, CHEN L F, XU X Y. Numerical modeling of thermal effects in a high-power injection-locked cw Ti: Sapphire laser [J]. Optics Communications, 2011, 284: 4207-4214.
- [22] YANG L, YUAN X D, DENG X, et al. Influence of ambient temperature on nanosecond and picosecond laser-induced bulk damage of fused silica [J]. Advances in Condensed Matter Physics, 2014, 2014: 308918.
- [23] 国家仪器仪表工业总局. 光学零件的面形偏差, 检验方法 (光圈识别): GB/T 2831—1981 [S]. 国家标准总局, 1981.
- State Administration of Instrument Industry. Surface form deviation of optical elements—Inspection methods: GB/T 2831—1981 [S]. State Administration of Standards, 1981.
- [24] TORRES-TORRES D, MUNOZ-SALDANA J, GUTIERREZ-LADRON-DE GUEVARA L A, et al. Geometry and bluntness tip effects on elastic-plastic behaviour during nanoindentation of fused silica: Experimental and FE simulation [J]. Modelling and

Simulation in Materials Science and Engineering, 2010, 18(7): 075006.

作者简介



E-mail: daisy_1005@126.com

Tian Xiao received her B. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2007, and received her M. Sc. and Ph. D. degrees both from University of Chinese Academy of Sciences in 2010 and 2015, respectively. She is currently an associate professor at Xi'an Aeronautical Institute. Her research interests include high power laser technology and its application.



E-mail: by@nwu.edu.cn

Bai Yang (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Northwest University in 2001, 2004 and 2010, respectively. He is currently a professor at Northwest University. His research interests include laser nonlinear frequency changes and high-energy lasers and their application technologies.

田晓, 2007 年于西安理工大学获得学士学位, 2010 年和 2015 年于中国科学院大学分别获得硕士和博士学位, 现为西安航空学院副教授, 主要研究方向为高功率激光及应用。

白杨 (通信作者), 2001 年, 2004 年和 2010 年于西北大学分别获得学士、硕士和博士学位, 现为西北大学教授, 主要研究方向为光学非线性频率转换、高功率激光器及应用技术。