

用于材料高温光学参数测量的半椭球反射镜 光机特性分析

管恒睿¹, 郑锋华^{1,2*}, 李文祥¹, 亢超¹, 杨永兴¹, 李金鹏^{1,2**}

¹中国科学技术大学南京天文仪器研制中心, 安徽 合肥 230022;

²中科院南京天文仪器有限公司, 江苏 南京 210042

摘要 为提升材料高温光学参数测量设备的光能利用率以及在待测样品表面获得更高的辐照度, 将半椭球反射镜应用于该设备中。首先介绍材料高温光学参数测量设备以及半椭球反射镜在该设备中的作用, 然后利用光线追迹和有限元分析的方法对半椭球反射镜的光学特性和面形变化分别进行分析, 接着对半椭球反射镜在 30 °C 下的面形变化对其光学特性的影响进行研究, 最后通过三坐标测量仪对半椭球反射镜内表面的面形进行测量, 并对仿真结果进行验证。实验结果表明: 30 °C 下, 半椭球反射镜去除椭球形变之后的形变量均方根(RMS)为 2.15 μm, 使用 Φ15 mm 黑体辐射源所获得的辐照均匀度为 61%, 能量利用率为 7.6%, 利用三坐标测量仪检测得到的 RMS 为 5.75 μm。本研究为测量材料高温光学参数提供了一种新的思路。

关键词 几何光学; 半椭球反射镜; 光学参数; 光线追迹; 有限元分析

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0608002

Analysis of Optomechanical Characteristics of Semi-Ellipsoidal Mirrors for Measuring High-Temperature Optical Parameters of Materials

Guan Hengrui¹, Zheng Fenghua^{1,2*}, Li Wenxiang¹, Kang Chao¹,
Yang Yongxing¹, Li Jinpeng^{1,2**}

¹Nanjing Research Center of Astronomical Instruments, University of Science and Technology of China,
Hefei, Anhui 230022, China;

²Nanjing Astronomical Instruments Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu 210042, China

Abstract In order to improve the light energy utilization of equipment for measuring high-temperature optical parameters of materials and obtain better irradiance on the surface of the sample to be tested, a semi-ellipsoidal reflector is applied to the equipment. First, the equipment for measuring high-temperature optical parameters of materials and the role of the semi-ellipsoidal mirror in the equipment are introduced. Then, the optical characteristics and surface shape changes of semi-ellipsoidal mirrors are analyzed by using ray tracing and finite element analysis methods, and the influence of surface shape change of the semi-ellipsoidal mirror at 30 °C on optical characteristics is analyzed. Finally, the shape of the inner surface of the semi-ellipsoid mirror is measured by the three-coordinate measurement instrument, and the simulation results are verified. Experimental results show that: at 30 °C, the root mean square (RMS) of the deformation of the semi-ellipsoidal mirror after removing ellipsoid deformation is 2.15 μm, the irradiation uniformity obtained by using a Φ15 mm blackbody radiation source is 61%, the energy utilization is 7.6%, and the RMS is 5.75 μm measured by the three-coordinate measuring instrument.

收稿日期: 2020-09-29; 修回日期: 2020-10-27; 录用日期: 2020-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(12003067)、GF 科工局项目重点研发项目(TDZX-19-003-1)、上海市星系与宇宙学半解析研究重点实验室开放课题(SKLA1901)

* E-mail: 13770646779@163.com; ** E-mail: kingpenglee@163.com

This study provides a new way to measure high-temperature optical parameters of materials.

Key words geometric optics; semi-ellipsoidal mirror; optical parameters; ray tracing; finite element analysis

OCIS codes 080.4295; 080.4228

1 引言

作为热辐射和光学领域最基础的物性参数,材料的光学参数研究一直受到广泛的关注,但是目前绝大多数材料的光学参数都是在常温下测量得到。随着航空航天、能源动力等技术的进步,工程应用中温度环境向极高或极低方向发展,高温的工况也越来越多,并且统计研究表明:材料的光学参数除与材料种类、辐射波长等因素有关外,温度也是影响材料光学参数的重要因素之一^[1-3],因此,为满足高温条件下的热辐射计算需求,获得高温条件下的材料的光学参数就显得尤为重要。

椭球反射镜由于具有独特的聚光特性,在检测领域以及太阳模拟器方面都有广泛的应用^[4-10]。高静等^[4]将椭球反射镜应用于无创生化分析;张燃等^[6]将椭球反射镜应用于太阳模拟器组合聚光镜的设计;秦泰然等^[7]将椭球反射镜应用于单色光源系统设计;Chen^[10]将椭球反射镜应用于光学衍射层析技术。以上研究在引入椭球反射镜之后,都在能量的利用效率上取得了一定的提升。

目前利用反射光谱法或透射光谱法设计材料光学参数测量装置的原理是将光源照射到待测样品后产生的反射光线或者透射光线导入光谱仪中,通过分析光谱数据获得材料的光学参数^[11-12]。但是这样的方式未对光源发出的光线进行会聚,无法获得较高的辐照度和能量利用效率。因此将椭球反射镜应用到材料的光学参数测量领域作为设备的辐照系统可有效提升设备的能量利用率以及获得较好的辐照均匀性。

为了研究椭球反射镜在使用过程中的性能,采用光线追迹的方法研究椭球反射镜的能量利用率以及辐照度;利用有限元分析的方式仿真其内表面在不同温度状态下的面形变化情况;讨论半椭球反射镜在不同温度状态下的面形变化情况对其能量利用率以及辐照度的影响;通过三坐标测量仪测量半椭球反射镜内表面在加工过程中的面形变化情况,进而验证仿真的结论。

2 材料高温光学参数测量设备介绍

材料高温光学参数测量系统主要由半椭球面照射系统、性能光谱分析系统、样品辐射及观测系统、温控与防污染系统以及数据处理及图像分析系统共

5 部分组成。设备光路如图 1 所示,其中上半部分为反射特性测量光路,下半部分为透射特性测量光路,将黑体作为照射光源放置在半椭球反射镜的一个焦点处,另一个焦点处放置待测样品,由离轴抛物镜组和平面镜将待测样品出射的光线导入光谱仪中,实现待测样品反射特性以及透射特性的测量;在半椭球反射镜的安装底座内部安装强激光器,采用外部控制器控制强激光器的功率,在利用强激光器照射待测样品对其进行加热的过程中实现对测量材料温度的控制。

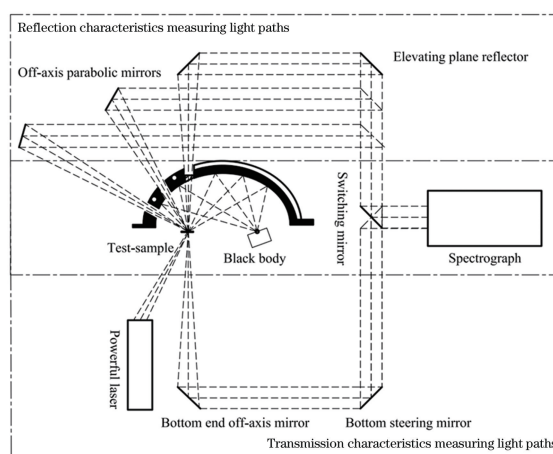


图 1 设备光路图

Fig. 1 Light path of device

半椭球反射镜系统主要由半椭球反射镜组成,半椭球反射镜的二维图如图 2 所示;其内表面为椭球光学面;半椭球反射镜具有双焦点,即第一焦点和第二焦点,其中第一焦点处配置有光源(该光源为主动照射光源),在第二焦点处放置待测样品。光源辐射的光线从一个焦点发出,可聚集到另外一个焦点处实现样品的照射;椭球反射镜上开设有不同视场窗口,供反射和透射性能分析。因此半椭球反射镜

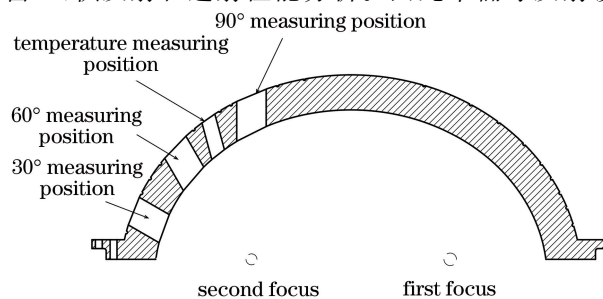


图 2 半椭球反射镜示意图

Fig. 2 Diagram of semi-ellipsoidal mirror

的使用效果将直接影响整套设备对于材料高温光学参数测量的准确性。

3 半椭球反射镜光机特性分析

3.1 半椭球反射镜光学特性分析

半椭球反射镜作为材料高温光学参数测量设备

表 1 半椭球反射镜光学追迹参数表

Table 1 Optical tracing parameters of semi-ellipsoid mirror

Modeling project	Setting type
Inner surface of semi-ellipsoidal mirror	Golden mask; reflectivity of 98.3%; parameters in model: $A=0.0001$, $B=0.015$, $g=2$
Blackbody radiating surface	Radiation source is lattice point light source; each wavelength ($2\ \mu\text{m}$, $5\ \mu\text{m}$, or $16\ \mu\text{m}$) traces 29701 rays; radiation angle is 120°
Surface of sample to be tested	Surface is set as a perfect absorber with a radius of 2.5 mm

需要说明的是,这里仅研究光线从黑体光源出射、经过半椭球镜面照射到待测样品表面的情况,不追迹待测样品受到辐射激发后向外辐射的情况,因此将待测样品设置为完全吸收表面。利用格点光源仿真黑体辐射源上的某一个面源,由于黑体实际发散角度为 120° ,因此这里格点出射光束张角也为 120° 。格点光源放置位置距离半椭球面镜中心 202.4 mm 处,即其中一个焦点位置,待测样品放置在另外一个焦点位置处。光线的追迹结果如图 3 所示,当点光源位于半椭球面的焦点附近位置时,产生的会聚焦斑情况如图 4 所示,其中图 4(a)为点光源位于焦点位置;图 4(b)和(c)为点光源位于焦点 x 方向 $\pm 2.5\ \text{mm}$ 的位置;图 4(d)和(e)为点光源位于焦点 y 方向 $\pm 2.5\ \text{mm}$ 的位置。

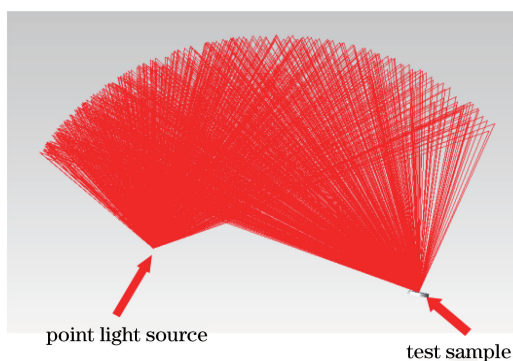


图 3 半椭球反射镜光线追迹结果

Fig. 3 Ray tracing result of semi-ellipsoidal mirror

的主要组成部分,其工作面的聚焦特性将直接决定该设备的测量效果,因此需要对该半椭球反射镜进行光学建模分析。利用光线追迹方法对半椭球反射镜进行研究,分析其工作面的会聚特性^[13]。各项建模参数如表 1 所示,其中模型参数中的 A, B, g 为归一化因子,用来表征工作面的散射特性。

从图 4 中可知:当点光源位于半椭球面的焦点位置,由点光源发出的光经半椭球面镜(这里未显示半椭球面镜)全部会聚到待测样品表面,焦斑为半径约为 0.2 mm 的圆形;而当点光源位于半椭球面焦点 x 方向 $\pm 2.5\ \text{mm}$ 时,焦斑的形状近似为一根直线;当点光源位于半椭球面焦点 y 方向 $\pm 2.5\ \text{mm}$ 时,焦斑的形状近似扇状。当点光源不在焦点位置时,均有部分能量未照射到待测样品上,这造成了能量损失。几种情况下的能量利用率如表 2 所示。

为了更加逼真地仿真黑体辐射在待测样品表面的真实辐照度,这里将在半椭球镜面的焦面处设置黑体表面辐射源,以进行进一步的辐照度分析。选取不同直径的黑体辐射源照射不同直径的待测样品。图 5(a)为 $\Phi 5\ \text{mm}$ 黑体辐射源在 5 mm 待测样品表面形成的辐照度;图 5(b)为 $\Phi 10\ \text{mm}$ 黑体辐射源在 5 mm 待测样品表面形成的辐照度;图 5(c)为 $\Phi 15\ \text{mm}$ 黑体辐射源在 5 mm 待测样品表面形成的辐照度。

由黑体辐射源模拟仿真得到,当只采用 $\Phi 5\ \text{mm}$ 黑体辐射源照射待测样品表面,由于离轴像差的影响,待测表面 $\Phi 5\ \text{mm}$ 范围内的辐照度均匀性为 39%,能量利用率为 35%;如果采用较大辐射面的黑体,则可以获得较好的辐照均匀性,例如采用 $\Phi 10\ \text{mm}$ 黑体辐射源时均匀度可达到 68%,然而能量利用率将会下降到 15.5%;黑体辐射面的进一步

表 2 点光源位于不同位置时的光能利用率

Table 2 Light energy utilization when point light source is located at different positions

Position	Focus position	At +2.5 mm in x direction	At -2.5 mm in x direction	At +2.5 mm in y direction	at -2.5 mm in y direction
Light energy utilization / %	95.0	17.0	17.0	12.5	12.5

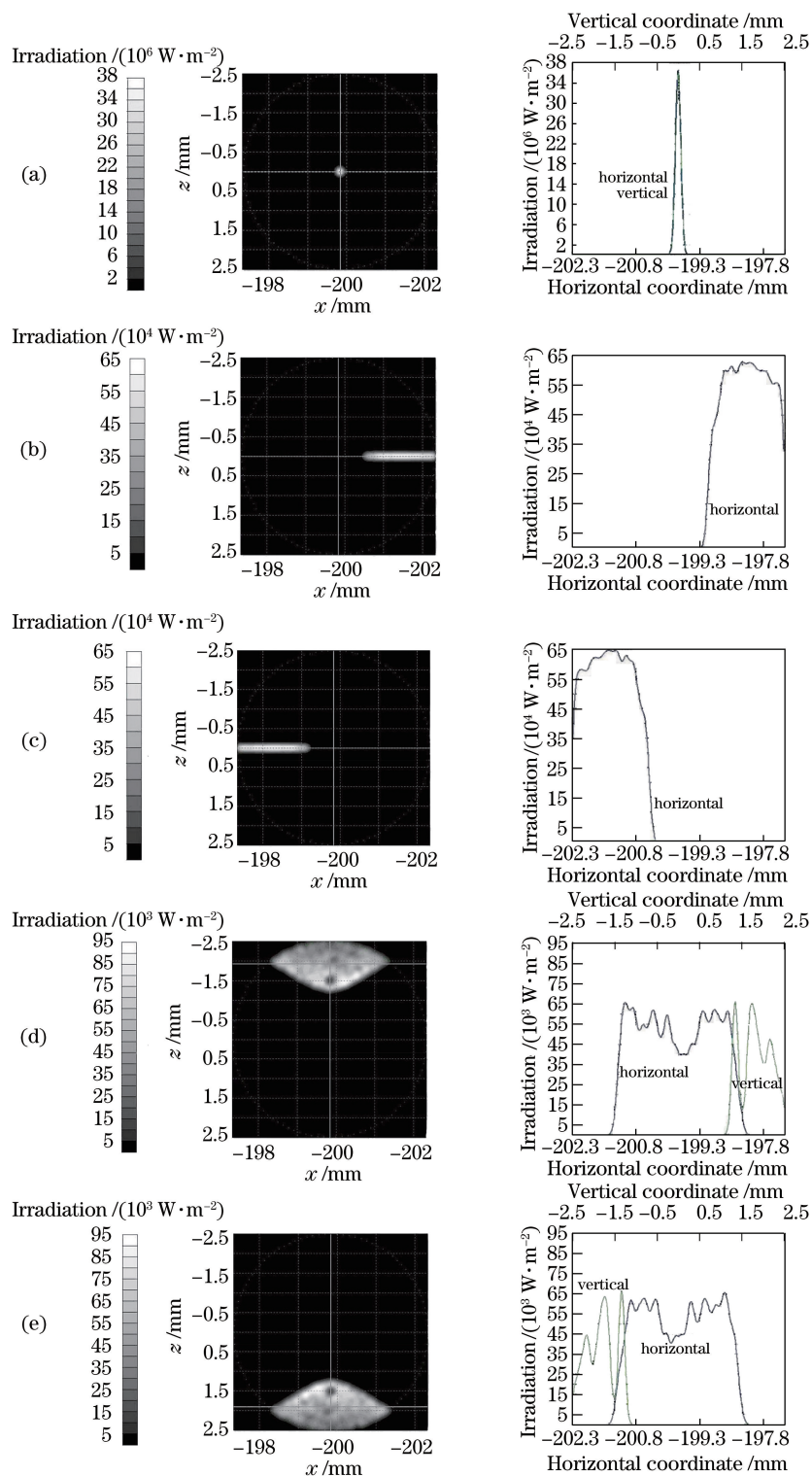


图 4 发光面源位于焦点附近不同位置时产生的会聚焦斑。(a)位于焦点位置;(b)位于 x 方向 +2.5 mm 处;
(c)位于 x 方向 -2.5 mm 处;(d)位于 y 方向 +2.5 mm 处;(e)位于 y 方向 -2.5 mm 处

Fig. 4 Convergent focus spots generated when luminous surface source is located at different positions near focal point.
(a) At focus position; (b) at +2.5 mm in x direction; (c) at -2.5 mm in x direction; (d) at +2.5 mm in y direction; (e) at -2.5 mm in y direction

增大虽然会进一步提高均匀度,但是效果已经不明显,且能量利用率下降到 8.4%。

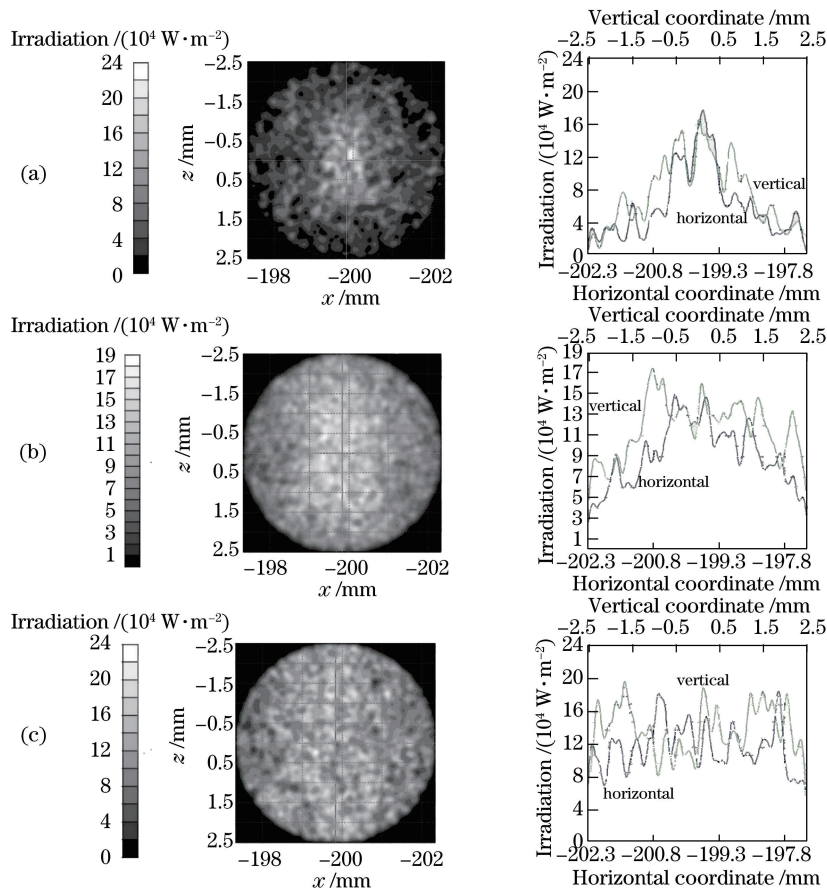


图 5 不同口径黑体辐射源在样品表面形成的辐照度。(a) $\Phi 5$ mm 口径黑体辐射源；
(b) $\Phi 10$ mm 口径黑体辐射源；(c) $\Phi 15$ mm 口径黑体辐射源

Fig. 5 Irradiance on sample surface from black body radiation sources with different diameters. (a) Black body radiation source with $\Phi 5$ mm diameter; (b) black body radiation source with $\Phi 10$ mm diameter; (c) black body radiation source with $\Phi 15$ mm diameter

3.2 半椭球反射镜面形分析

由于装夹、支撑或者其他载荷的影响,光学元件的镜面将会发生弹性变形,使仪器的性能受到影响。而半椭球反射镜作为该材料高温光学参数测量设备的核心光学元件,其在装调或者工作状态下的面形变化将会直接影响光学参数的准确性,因此有必要对半椭球反射镜进行有限元分析,计算出面形误差。模型构造按如下原则进行^[14]:

1) 严格按照三维模型构造,以保证有限元模型与设计结构一致;

2) 在关键的力传递路径上,网格划分较密;非关键部位遵循能量、刚度等效原则,可适当简化,简化后构件能等效真实构件对整机的质量(蕴含惯量以及热容量)和刚度的贡献。

该半椭球面镜的材料选取铝材 7075-T6,材料属性如下:密度为 2810 kg/m^3 ,弹性模量为 $7.2 \times 10^{10} \text{ Pa}$,泊松比为 0.33,抗拉强度为 $5.7 \times 10^8 \text{ Pa}$,

屈服强度为 $5.05 \times 10^8 \text{ Pa}$,热膨胀系数为 2.4×10^{-5} ,硬化因子为 0.85。

采用 10 节点四面体单元 Tet10 对模型进行自适应网格划分,生成 100712 个节点以及 65039 个单元,对半椭球镜的底端施加固定端约束。模型的温度载荷为 $(25 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ 。半椭球反射镜的有限元模型如图 6 所示。

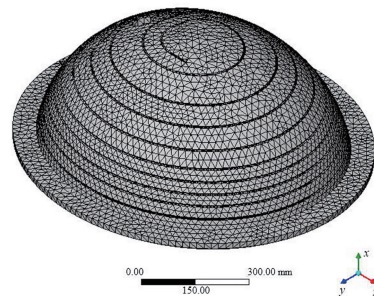


图 6 半椭球镜有限元建模示意图

Fig. 6 Diagram of finite element modeling of semi-ellipsoidal mirror

为了使仿真结果更加具有参考价值,按照半椭球反射镜实际的工作环境进行仿真。对模型施加的不同温度载荷涵盖了半椭球反射镜工作时的温度范

围,分别为 22, 24, 26, 28, 30 °C,其余加载条件均相同。考察半椭球反射镜工作面的变形情况,每一组的仿真结果分别如图 7(a)~(e)所示。

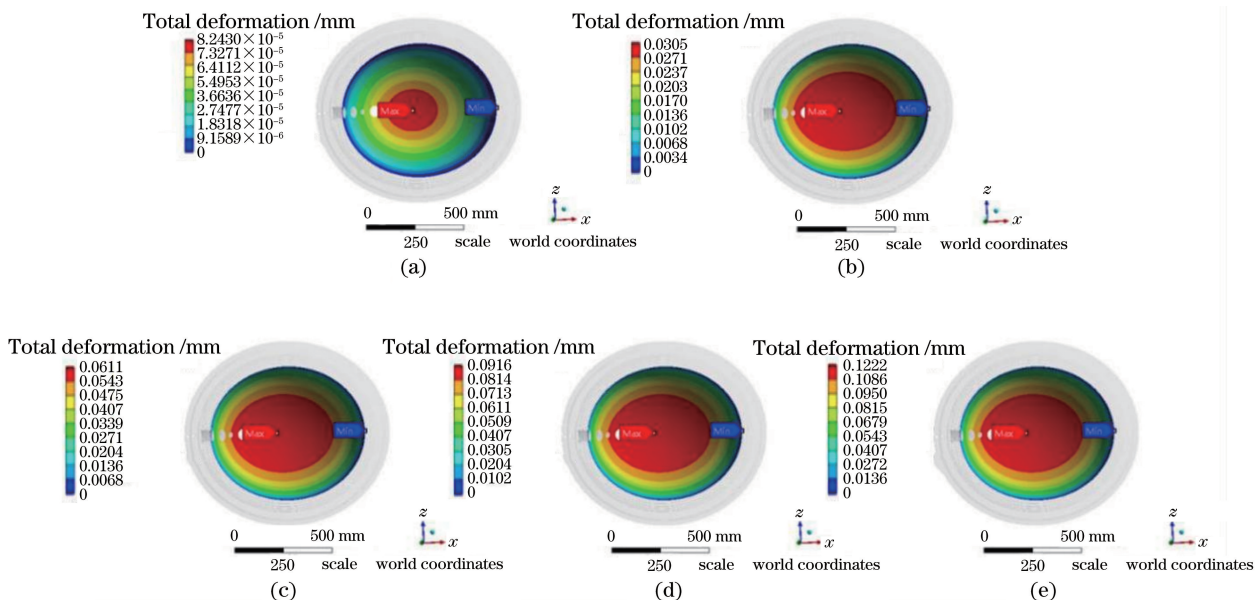


图 7 不同温度载荷情况下半椭球反射镜工作面的面形变化情况。(a) 22 °C ;(b) 24 °C ;(c) 26 °C ;(d) 28 °C ;(e) 30 °C

Fig. 7 Surface shape changes of semi-ellipsoidal reflector under different temperature loads.

(a) 22 °C ; (b) 24 °C ; (c) 26 °C ; (d) 28 °C ; (e) 30 °C

在[20 °C, 30 °C]温度区间内,随着温度的上升,半椭球反射镜工作面的变形最大值与平均值如

表 3 所示。

表 3 不同温度下半椭球反射镜工作面变形情况

Table 3 Deformation of working surface of semi-ellipsoidal reflector at different temperatures

Temperature / °C	22	24	26	28	30
Maximal deformation /mm	8.243×10^{-5}	3.049×10^{-2}	6.105×10^{-2}	9.160×10^{-2}	0.122
Average deformation /mm	2.971×10^{-5}	1.767×10^{-2}	3.537×10^{-2}	5.300×10^{-2}	0.071

由仿真分析结果可知,当半椭球反射镜的温度载荷为 30 °C,镜面的 RMS 值为 9.21 μm,镜面变形较大,有可能对光学性能造成较大的影响。但是由数据分析可知,形变大体呈椭球形状。该形变同样会使得一个焦面上的黑体辐射会聚到另一个焦面上。而真正对光学性能造成影响的是非椭球面的变形量。通过数据拟合的方式去除椭球形变,经计算得到非椭球形变量 RMS 为 2.15 μm。

4 半椭球反射镜光机特性分析结果讨论

对于本文所研究的纯聚光要求的系统,任何利用几何成像原理的设计远未达到理论上的集光能力,只有放弃成像要求才有可能获得理想的结果。所以这样的光学设计问题属于非成像光学的范畴。因此在设计过程中需要不考虑或者很少考虑像差对系统性能的影响,而是将光能利用率作为系统的评

价标准。

由于半椭球反射镜的工作温度被控制在室温 ±5 °C,现考察其在工作状态下由温度变化导致的面形变化对半椭球反射镜的辐照均匀度以及能量利用率的影响。仿真时主动照射光源仍为黑体辐射源,待测样品的口径为 5 mm。针对有限元分析得到的半椭球反射镜工作面的面形变化数据,通过面形拟合得到 Zernike 系数。最后通过光线追迹的方法分析面形变化情况下半椭球反射镜的辐照度和能量利用率。通过之前的有限元分析可知,在 30 °C 情况下,半椭球反射镜的面形变化最大,通过光线追迹的方法分析 30 °C 下半椭球反射镜的辐照均匀度与能量利用率,结果如图 8 所示。

通过对黑体辐射源进行仿真模拟得到当前情况下的辐照均匀度为 61%,能量利用率为 7.6%。半椭球反射镜温度的变化并不会对设备的能量利用率

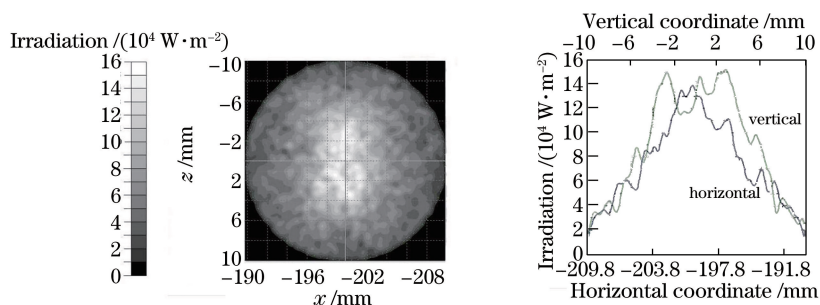


图 8 30 °C 情况下黑体辐射源在待测样品表面形成的辐照度

Fig. 8 Irradiance formed by the black body radiation source on the surface of the sample to be tested at 30 °C

产生较大的影响。

5 半椭球反射镜加工检测

Zygo 软件具有较强的面形分析能力,为了更好地指导半椭球反射镜的加工,采用三坐标测量机对半椭球反射镜内表面进行测量,得到半椭球反射镜内表面面形的 txt 格式文件,利用 Matlab 将得到的 txt 格式文件转换成 Zygo 可读的文件,然后通过

Zygo 读取获得半椭球反射镜内表面的峰谷(PV)值和 RMS 值,从而指导半椭球反射镜内表面的细磨和抛光。

为验证仿真模拟过程中所得到的结论,在半椭球反射镜加工过程中使用三坐标测量机对半椭球反射镜的反射面进行检测。在半椭球反射镜完成外形加工且还未对其内表面进行细磨抛光时,采用三坐标机测量其初始面形,结果如图 9 所示。

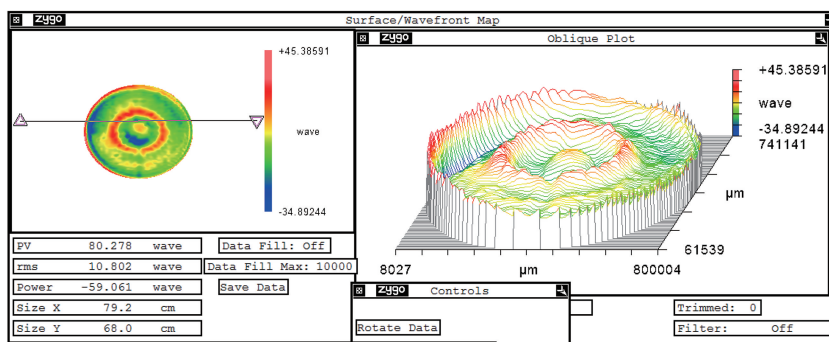


图 9 半椭球反射镜反射面初始检测面形

Fig. 9 Initial detection surface shape of the reflective surface of the semi-ellipsoidal mirror

在对内表面进行细磨抛光的过程中,每隔 2 d 利用三坐标测量机对半椭球反射镜的内表面进行检测,每次测量的结果如表 4 所示。

通过最终的三坐标测量机检测结果可以得知,

其半椭球反射镜的面形结果为:PV 值为 98.9 μm , RMS 为 5.75 μm 。面形的最终检测结果与建模仿真结果进一步验证了此方法的可行性以及实用性。半椭球反射镜的最终检测结果如图 10 所示。

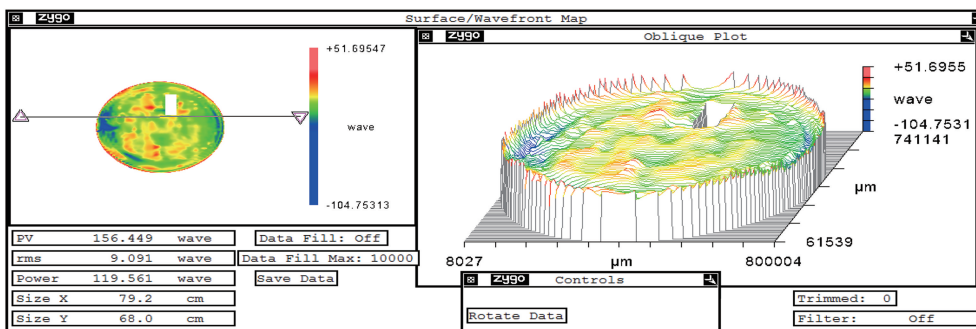


图 10 半椭球反射镜反射面最终检测面形

Fig. 10 Final inspection surface shape of semi-ellipsoidal mirror

表 4 半椭球反射镜内表面检测结果
Table 4 Detection results of inner surface of semi-ellipsoidal mirror

Measurement serial number	Peak valley (PV) value / λ	RMS value / λ
1	80.278	10.802
2	162.070	10.524
3	96.956	14.800
4	99.498	9.410
5	214.182	8.959
6	138.227	7.344
7	80.773	5.149
8	96.005	4.753
9	128.210	4.806
10	210.114	19.985
11	192.564	18.623
12	216.705	18.619
13	210.081	17.296
14	182.487	15.536
15	169.210	13.318
16	152.320	11.379
17	162.070	10.524
18	156.449	9.091

6 结 论

针对应用在材料高温光学参数测量系统中的半椭球反射镜展开分析。在对其光学特性分析过程中,首先以点光源为例,分析了半椭球反射镜的能量利用率以及辐照度。结果表明,在使用点光源的情况下,在光源位于半椭球反射镜的焦点处时辐照效果最好,光能利用率最高。当点光源在焦点的 x 方向和 y 方向偏离时,能量利用率和辐照均匀性都会有不同程度的损失。然后以黑体辐射源为例分析半椭球反射镜的能量利用率以及辐照均匀度。结果表明,选择较大直径的黑体辐射源可以获得较高的辐照均匀度,但是能量利用率却在下降。因此在使用黑体辐射源时,为获取较高的辐照度和能量利用率,应综合考虑黑体辐射源和待测样品的尺寸。在对半椭球反射镜面形展开分析的过程中,利用有限元的方法仿真半椭球反射镜工作状态下的面形变化情况,通过施加不同的温度载荷以及相同的边界条件,考察半椭球反射镜在不同温度情况下的面形变化情况。仿真结果表明,随着温度的升高,半椭球反射镜工作面的面形变化量逐渐变大。在 30 °C 情况下,其工作面的形变量 RMS 值为 9.21 μm 。但是在去除椭球形变后,计算得到的非椭球形变量 RMS 为 2.15 μm 。对于非成像要求的系统,该面形变化量

足以满足使用要求。基于利用有限元仿真得到的半椭球反射镜的面形变化数据,并通过面形拟合得到 Zernike 系数,然后利用光线追迹分析在面形变化情况下的半椭球反射镜的辐照度以及能量利用率。结果表明,在 30 °C 情况下,采用 $\Phi 15$ mm 黑体辐射源所获得的辐照度为 61%,能量利用率为 7.6%。最后在加工过程中利用三坐标测量机对半椭球反射镜的内表面进行检测,最终得到的 RMS 为 5.75 μm 。检测结果与利用有限元分析得到的结果较为一致,表明该半椭球反射镜能够在实际的使用中达到仿真的效果。该分析对将大口径半椭球反射镜应用于材料高温参数测量设备中具有一定的借鉴意义,为材料的高温光学参数测量提供了一个新的思路。

参 考 文 献

- [1] Šik J, Hora J, Humlíček J. Optical functions of silicon at high temperatures [J]. *Journal of Applied Physics*, 1998, 84(11): 6291-6298.
- [2] Thomas M E, Andersson S K, Sova R M, et al. Frequency and temperature dependence of the refractive index of sapphire [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1998, 39(4): 235-249.
- [3] Li W W, Zhu J J, Xu X F, et al. Ultraviolet-infrared dielectric functions and electronic band structures of monoclinic VO₂ nanocrystalline film: temperature-dependent spectral transmittance [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(1): 013504.
- [4] Gao J, Lu Q P, Peng Z Q, et al. Parameter design and optimization of collecting light ellipsoidal reflector in near infrared noninvasive biochemical analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0822007.
高静, 卢启鹏, 彭忠琦, 等. 近红外无创生化分析中集光椭球反射镜参数设计与优化 [J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0822007.
- [5] Liu L, Li L. Feature analysis on optical system of close range laser weapon [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(1): 109-112.
刘琳, 李林. 近距离激光武器光学系统特性分析 [J]. *激光与红外*, 2018, 48(1): 109-112.
- [6] Zhang R, Zhang G Y, Liang J, et al. Design on composite condenser of solar simulator for meteorological radiation [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2018, 35(3): 31-35.
张燃, 张国玉, 梁婧, 等. 气象辐射用太阳模拟器组合聚光镜设计 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2018, 35(3): 31-35.
- [7] Qin T R, Qu A L. Design of elliptical reflector based on fluorescence microscope monochromatic source

- [J]. Journal of Applied Optics, 2007, 28(6): 720-723.
- 秦泰然, 瞿安连. 基于荧光显微镜单色光源系统的椭球反射镜的设计[J]. 应用光学, 2007, 28(6): 720-723.
- [8] Yakupu X, Tuersun P, Wu P P. Optimization of light absorption and scattering properties of gold nanospheroids[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0429001
- 夏伊丁·亚库普, 帕尔哈提江·吐尔孙, 武盼盼. 金纳米旋转椭球的光吸收和散射特性优化[J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0429001
- [9] Al-Kuhaili M F, Saleem M, Durrani S M A. Optical properties of iron oxide ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) thin films deposited by the reactive evaporation of iron [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 521: 178-182.
- [10] Chen Z, Gao Y F, Kang L T, et al. VO_2^- based double-layered films for smart windows: optical design, all-solution preparation and improved properties [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95(9): 2677-2684.
- [11] Yan Y D, He J H, Wang F, et al. Design of optical system for SG-III near backscatter diagnosis [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(6): 1469-1476.
- 闫亚东, 何俊华, 王峰, 等. 神光-III 主机近背向散射诊断光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1469-1476.
- [12] Li M Z. Research on optical diffraction tomography with large-angle beam scanning based on elliptical mirror[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- 李梦周. 基于椭球反射镜大角度光束扫描的光学衍射层析技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [13] Zhao L L, Sun D L, Wang L L, et al. Ray-tracing program for grazing incident X-ray microscope system[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0401002.
- 赵玲玲, 孙德林, 王丽丽, 等. 掠入射 X 射线显微镜系统光线追迹程序[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0401002.
- [14] Sui H, Gao X R, Luo L, et al. Finite element simulation and experiment on interaction of surface waves excited by laser point or line source with rail defects[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(8): 081201.
- 隋皓, 高晓蓉, 罗林, 等. 激光点源与线源激发表面波与钢轨缺陷作用的有限元仿真和实验[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(8): 081201.