

文章编号 1004-924X(2014)06-1469-08

神光-Ⅲ 主机近背向散射诊断光学系统设计

闫亚东^{1*}, 何俊华¹, 王 峰², 张 敏¹, 李世博^{1,3}

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;

2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:通过分析激光聚变中近背向散射光的收集方式,提出了采用金属环形椭球镜有效收集神光-Ⅲ主机装置的近背向散射光并测量其能量份额的方法。给出了椭球镜参数的设计方法。大口径椭球镜采用 4 块拼接形式,便于进入入口为 $\varphi 1.0\text{ m}$ 的靶室;镜体采用超硬铝材、三角形减重槽设计,实现了高稳定性、轻量化。介绍了光学系统总体结构,并对其集光效果进行了模拟评价。分析了镜体设计中的关键问题,并提出采用点激光器阵列进行中间过程面形监测的方法,避免了工序反复。分析了系统杂散光来源,采取了物理隔离、光学吸收和滤光片过滤等措施降低杂散光干扰。研制的环形椭球镜外径为 1 200 mm,内径为 400 mm,最大离轴量为 1 411 mm,最大厚度为 67 mm,重量约为 48 kg;对 5 mm 的物方视场,像点光斑大小约为 $\varphi 1.2\text{ mm}$ 。实验显示该近背向散射诊断系统可满足神光-Ⅲ主机背向散射诊断的需求。

关键词:激光聚变;激光诊断;光学设计;近背向散射;椭球镜;金属反射镜;点光源

中图分类号:TN241;TL653 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142206.1469

Design of optical system for SG-Ⅲ near backscatter diagnosis

YAN Ya-dong^{1*}, HE Jun-hua¹, WANG Feng², ZHANG Min¹, LI Shi-bo^{1,3}

(1. Xi'an Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;

2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: yyd@opt.ac.cn

Abstract: After analysis the collecting methods of near backscatter light in laser fusion, a metal ellipsoidal mirror was proposed to collect the near backscatter light of SG-Ⅲ laser facility. Then, the method to determine the parameters of ellipsoidal mirror was discussed. The mirror is composed of four pieces, which makes it entering into the target chamber easily. The mirror is made of super hard aluminum, and a triangular weight reducing slot is designed on the back of the mirror to reduce its weight and improve its mechanical stability. The overall structure of the optical system was introduced, and the light gathering performance was simulated using optical software. The key issues in ellipsoidal mirror design, including material selection and structure selection, were analyzed. In order to avoid rework, a semiconductor laser array was developed specially to test the surface in design processing. The stray lights in the system were analyzed, physical isolation, optical absorbing and optical

收稿日期:2013-08-20;修订日期:2013-10-07.

基金项目:国家教育部博士点基金(西部)资助项目(No. 200929441213)

filters were used to control them. The ring ellipsoidal mirror with a weight of 48 kg has an outside diameter of 1 200 mm, an inside diameter of 400 mm, the maximum off-axis magnitude of 1 411 mm, and the maximum thickness of 67 mm. The image spot size is about 1.2 mm within a field of view 5 mm. This system mentioned above can offer a reference for near backscatter diagnostic in inertial confinement fusion research.

Key words: laser fusion; laser diagnosis; optical design; near backscatter; ellipsoidal mirror; metal mirror; point light source

1 引言

在激光间接驱动聚变中,激光脉冲与黑腔耦合产生 X 射线及等离子体,利用 X 射线驱动燃料实现聚变。然而,在耦合过程中等离子体对入射激光产生散射,降低了激光的耦合效率,出现了等离子体“堵口”现象^[1-2]。该散射在黑腔外主要显现为背向散射^[3],其中心散射光沿打靶光路逆向传输,称为“全孔径背向散射光”;中心圆周的散射光称之为“近背向散射光”,光斑呈中空环状。背向散射光的诊断包括全孔径背向散射诊断和近背向散射诊断,它为研究激光-等离子体相互作用提供了一种技术途径。

在近背向散射诊断中,散射光的收集方式非常重要。美国 Nova 和国家点火装置(NIF)的惯性约束聚变(ICF)装置采用聚合物漫反射板将近背向散射光均匀漫反射在半球空间中,在靶室外利用门控相机对漫反射光进行取样,并据此推断整个近背向散射光的能量^[4-5];根据杂散光到达相机的时刻差异,用相机快门进行信号选择以降低杂散光干扰。但该方法设备成本较高,技术难度较大,同时由小量推算大量容易出现较大偏差。在国内,先前在神光-III 原型装置上采用玻璃球面镜收集近背向散射光,并将之会聚于靶室外探测^[6-7]。由于其球面未镀高反膜,反射率很低,绝大部分能量透过球面入射在毛玻璃状后表面上。该方案的不足在于:玻璃镜成本高、重量大;球面反射镜最佳物像点限制在其光轴上,大型激光驱动装置很难满足这种光路排布的需求;后表面的散射光对测量结果的影响也不容忽视。

本文基于神光-III 主机装置提出用金属质环形椭球镜收集近背向散射光,镜体外径为 1 200 mm、内径为 400 mm,由 4 块子镜拼接而成。该方案通过椭球参数设计可以自由选择会聚光出射

法兰口位置,金属镜成本低且机械加工性好,便于轻量化和分块进入最大入口只有 $\varphi 1\text{ m}$ 的靶室内进行安装。近背向散射光几乎全部被会聚,取样率高,有利于提高测量准确度。但在实施中也存在诸多难点,如出射法兰口选择不当可能导致椭球镜的离轴量较大,使之加工检测困难;轻量化加工及拼接时镜面容易变形等。本文首先介绍了光学系统的总体设计方案,然后分析了系统中的关键技术问题。

2 光学系统设计

2.1 近背向散射诊断需求

神光-III 主机装置拥有 48 束打靶激光^[8],它们以不同的角度入射黑腔,以实现燃料的均匀压缩。不同角度的打靶激光其背向散射情况也不同,本系统是针对纬度为 125° 的一束打靶激光(见图 1)设计的。与打靶激光相比,背向散射光的空间立体角较大。位于打靶光路周围的近背向散射光将入射在靶室内壁上。近背向散射诊断就是收集该部分光,并将之会聚于选定的出射法兰口之外,然后依据散射光谱类型(拉曼散射 $400\sim 700\text{ nm}$ 、布里渊散射 $(351\pm 3)\text{ nm}$ 进行光谱分离,

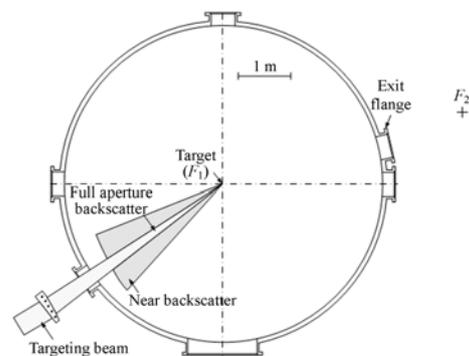


图 1 背向散射光空间分布

Fig. 1 Space distribution of backscatter light

最后由 OPHIR 能量计测量光谱能量。

2.2 散射光收集镜的面形选择及参数设计

近背向散射光收集镜的设计是光学系统设计的重点。由于散射光是从靶点发出,且收集后会聚于靶室外一点,而椭球镜面能够将一个焦点发出的光完美地会聚于另一焦点,因此它是近背向散射光收集的理想面形。该椭球镜被安装在直径为 6 m 的靶室内收集待测光路的近背向散射光,并将之会聚于出射法兰口之外。

在设计椭球镜参数之前,首先要明确会聚光的出射法兰口位置,这决定了椭球镜的离轴量和加工难度以及设备安装维护的方便性。综合考虑上述因素,选择的出射法兰口位置如图 1 所示。椭球镜的其中一个焦点位于靶点(F_1),另一个位于出射法兰口之外(F_2)。椭球镜面中心 O 与靶点的距离设计为 2 600 mm,这样镜体背面距离靶室内壁约 400 mm,便于设计镜体的支撑和五维调节机构。焦点 F_2 设置在出射法兰口外 1.5 m 处,这段光程在用于光谱分离、杂散光过滤的折叠光路中。椭球镜对应椭圆的结构示意图如图 2 所示,其中 F_1 为靶点, F_2 为出射法兰口外的会聚点, O 点为椭球镜面中心点, OF_1 为 2 600 mm。根据靶室模型可知,入射光轴 OF_1 和反射光轴 OF_2 夹角为 12.1° ,且测得 OF_2 为 7 200 mm,故椭圆半长轴 a 为 4 900 mm。利用几何关系:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (1)$$

可以计算得出椭球镜对应的椭圆半长轴 b 为 4 302.57 mm。

根据近背向散射光的空间分布,集光椭球镜的形状应是以 O 点为中心的环状。环形内径主

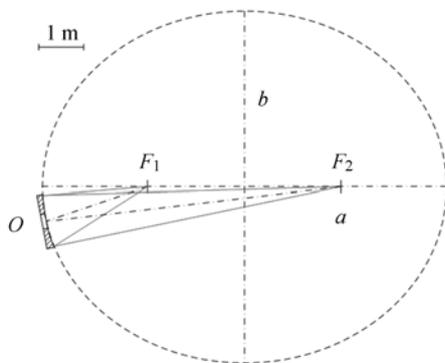


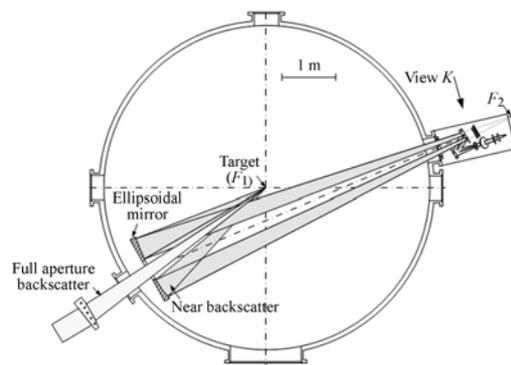
图 2 椭球镜参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ellipsoidal mirror parameters

要根据待测打靶激光在椭球镜位置处的光斑直径确定;外径应在不影响打靶光路的前提下使环形椭球镜覆盖整个近背向散射区域。根据主机设计,椭球镜处三倍频打靶激光光斑对角线约为 332 mm。考虑到打靶基频光和二倍频光的空间偏离,实际的打靶光斑要更大一些。为了防止打靶光路与椭球镜干涉,将椭球镜的内孔设计为 400 mm。根据已有的研究成果,近背向散射光主要集中在空间张角约为 30° 的范围内,按此计算在距离靶点 2 600 mm 处的椭球镜外径应为 1 300 mm。但模拟结果表明,椭球镜边缘与附近的其它支路的打靶激光光束过于接近,为了避免干扰其它支路的打靶激光,将近背向散射集光椭球镜外径设计为 1 200 mm。镜面中心离轴量为 836.7 mm,边缘最大离轴量为 1 411 mm。

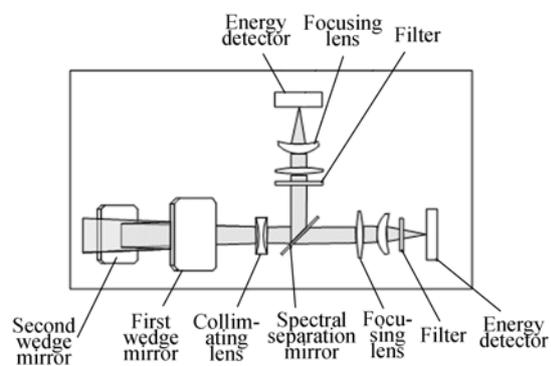
2.3 光学系统总体设计

基于上述椭球镜设计的近背向散射诊断光路如图 3(a)所示。从靶点 F_1 出射的近背向散射光



(a) 整体结构

(a) Overall view



(b) K 向放大视图

(b) Enlarged view K

图 3 近背向散射光路结构

Fig. 3 Near backscatter light path

经椭球镜会聚到靶室之外的 F_2 点。如图 3(b) 所示,在靶室外,光束会聚之前依次经过第一楔形反射镜的衰减和第二楔形反射镜反射,然后经负透镜准直为平行光;平行光束经色分离元件后, (351 ± 3) nm 布里渊散射光被反射,拉曼散射光 $(400 \sim 700)$ nm 被透射;在透射支路中,光束经过会聚镜组会聚,再经带通滤波片滤波后到达能量计探头;在反射支路中,光束经紫外高透、长波截止滤片(ZWB2)滤波,再经会聚镜组会聚后到达能量计探头。

在光学设计中,为防止近背向散射能量过强损伤能量探头,光路中的第一楔形反射镜为能量衰减镜。由此绝大部分近背向散射能量被分离掉,分离掉的这一部分能量要严格控制,避免干扰测量结果。

2.4 光学系统集光效果评价

由于光学系统用于收集能量,而非成像,因而它的性能考察不采用成像效果模式^[9],仅考察其

会聚能力即可。在物方视场 $\varphi 5.0$ mm、波长包括 (351 ± 3) nm 和 $400 \sim 700$ nm 的情况下,光学系统的弥散斑如图 4 所示,像点弥散斑的最大直径约为 1.2 mm。而系统使用的能量计探头的光敏面为 40 mm \times 40 mm,远大于光学系统会聚光斑的尺寸,因此光学系统的集光效果较好,能够满足使用需求。

2.5 椭球镜的集光效率

椭球镜的集光效率指其收集近背向散射光能量的百分比。为防止镜体干涉打靶激光,镜体和环孔之间留有一定间隙,但这会导致近背向散射光有一部分被遗漏,这部分能量可通过面积与能量分布的积分来获得。若背向散射光主要分布在 30° 的圆锥角中,且边缘能量密度降至峰值的 5%,呈近似高斯分布,则在距离靶点 2 600 mm 处、 $\varphi 1 300$ mm 内的散射空间分布如图 5(a) 所示,散射区包含了散射总能量的 95.3%。外径 1 200 mm 内的散射空间分布如图 5(b) 所示,区域包含了散射总能量的 92.7%。外径 1 200 mm、内径 400 mm 的椭球镜上的能量分布如图 5(c) 所示,镜面覆盖了散射能量的 67.4%。充满打靶透镜的全孔径背向散射在椭球镜处的能量分布如图 5(d) 所示,其覆盖了总能量的 14.4%。由上述数据计算得到,间隙部分被遗漏的能量占总散射能量的 10.9%。若背向散射光的空间分布更锐利,遗漏比率会降低一些。若将 $\varphi 1 300$ mm 内包含的能量近似为总散射能量,遗漏部分计入近背向散射,则椭球镜的近背向散射能量收集效率为 83.3%。

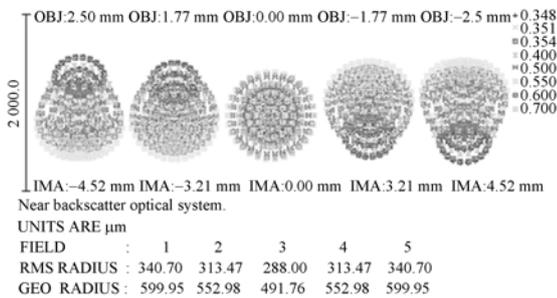


图 4 光学系统弥散斑
Fig. 4 Spot diagram of optical system

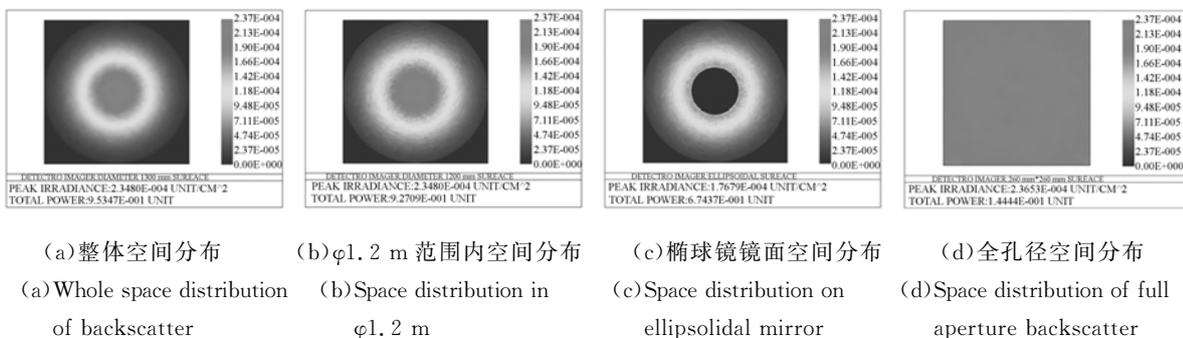


图 5 背向散射光的空间分布
Fig. 5 Space distributions of backscatter on different surfaces

3 椭球镜镜体设计及面形控制

镜体设计包括材料选择、结构形式设计等,因靶室的入口较小($\varphi 1.0\text{ m}$),且在靶室内壁上安装操作不便,因此要求镜体采用分块拼接的形式以便进入靶室,并进行轻量化以减缓安装的不便。然而,这给镜面面形控制带来了较大的困难。

在反射镜选材方面,常用的光学反射镜材料有光学玻璃、陶瓷材料、金属等。光学玻璃是最常用的反射镜材料,在超大型反射镜中的应用非常广泛^[10-11];但玻璃材料的轻量化加工困难,大口径元件因需求量小,一般从材料开始就需要特殊定制,因而研制成本较高。陶瓷材料稳定性好,成型方便,在空间相机领域有重大应用^[12-14];但目前陶瓷材料的制作尺寸有限,成本也较高。金属材料尤其是超硬的铝合金材料重量轻,机械加工性好,成本低;但其热膨胀系数大,易变形,表面必须采取特殊的硬化处理才能抛光成镜面。本文考虑金属镜成本低、密度小、重量轻、硬度高;且铝为非磁性材料,辐射后无残留,有利于提高基底光洁度,在恒温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的工作环境中热膨胀小,镜体采用了超硬铝。

基于上述要求及分析结果设计的金属椭球镜如图 6 所示。它呈平凹状,由 4 块子镜拼接而成,其背面为拼接基准面。由于采用三角形减重槽进行轻量化设计^[15],其具有较好的结构稳定性。同时依据力学分析结果对轻量化设计结果进行了反复优化^[16],最终镜体最大边缘厚度为 67.4 mm ,

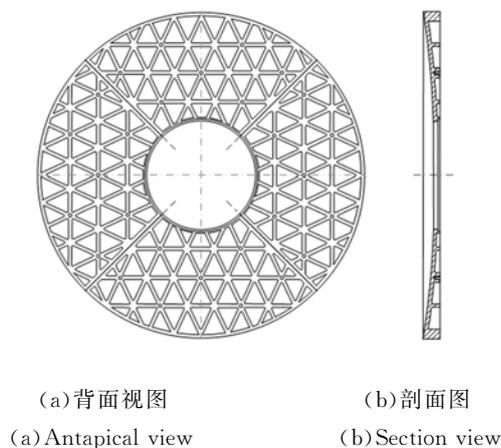


图 6 椭球镜结构

Fig. 6 Structure of ellipsoidal mirror

内圆最薄位置为 25.3 mm ,椭球镜总质量约为 48 kg 。这种结构在理论上满足力学需求;但镜片厚度不均,成型后材料容易产生应力变形,因此加工中必须规避应力变形。

为了控制镜体的形变,必须对研制的中间环节进行面形检测,避免返工。然而,机械加工后的椭球镜表面光洁度仍然较低,无法利用光学的方法进行面形检测。在机械法检测设备中,轮廓仪是常用的非球面检测设备,它通过逐点坐标测量来绘制被测面轮廓,但测量数据量大,周期长,设备也较昂贵。

考虑到本椭球镜为非成像元件,面形精度要求较低,可用一些低精度的检测设备完成测试。以低成本、使用方便为目标,本文研制了一种点激光器阵列装置(见图 7)。它是由若干个激光器构成的阵列结构,当所有激光束会聚于一个焦点时,就模拟了一个点光源。该点光源发出的是由一系列离散细光束组成的锥形光束,其锥角根据会聚点位置来获得。椭球面只需进行简单的抛光就能在该装置上进行检测。虽然表面的刀痕对入射激光仍有垂直刀纹方向的散射,但反射光的主光斑在远处依然清晰。检测原理如图 8 所示,将点光源置于椭球镜的第一焦点 F_1 处,光束经反射后会聚;若椭球镜没有形变,则所有光束会聚在椭球镜第二焦点 F_2 处;若光束没有很好会聚,则可沿着光束追迹到椭球镜面,找出变形区域,并根据偏离情况大致判断变形量。

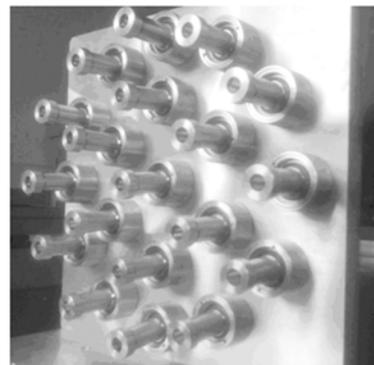


图 7 激光阵列结构

Fig. 7 Structure of laser array

镜面化前的椭球镜面形检测可为后续的镜面化工艺打下良好的基础,简化了检测加工工艺过程。最终研制的椭球镜实物照片如图 9 所示。

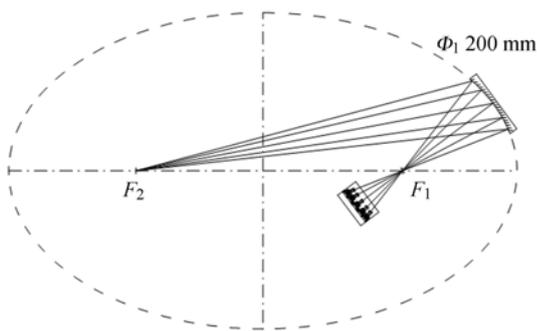


图 8 椭球镜检测示意图

Fig. 8 Schematic diagram of surface measurement for ellipsoidal mirror with laser array

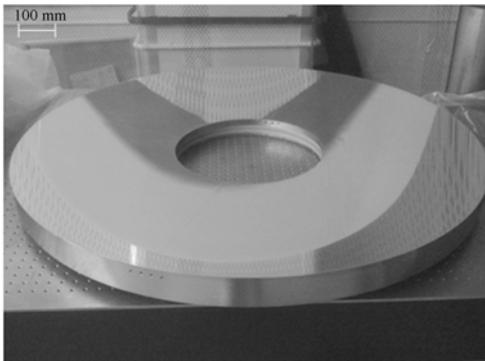


图 9 椭球镜微缝拼接实物照片

Fig. 9 Ellipsoidal mirror with small gaps

4 系统杂散光控制

近背向散射诊断系统的杂散光主要有两个来源:靶室内的打靶杂散光和被第一块楔形反射镜分离掉的近背向散射光。打靶杂散光主要是二倍频激光(526.5 nm)和基频光(1 053 nm),它们投射在靶室内壁上并经过多次漫反射从法兰口出射,这部分光的方向不规则。而被第一块楔形反射镜分离掉的近背向散射能量占据总散射能量的绝大部分,若不给予很好的控制,会对测量结果造成较大干扰。

杂散光的控制措施如图 10 所示,主要采用了光隔离板、遮光罩、光吸收体以及滤光片等措施^[17]。其中,光隔离板仅留有一个通光小孔,它将数据采集光路与前端杂光较多的光路隔离开来。隔离板小孔设计有遮光罩,用于阻碍大角度杂散光经通光孔到达数据采集室。光吸收体由有色玻璃(AB10)薄片平行排列而成,AB10 在 240

~700 nm 每毫米的透过率不足千分之一,在 700 ~1 100 nm 每毫米的透过率不足百分之一。这样,透过第一楔形反射镜的散射光在吸收体内经过多次分束、吸收后其能量已经基本消失,不会对数据采集造成影响。

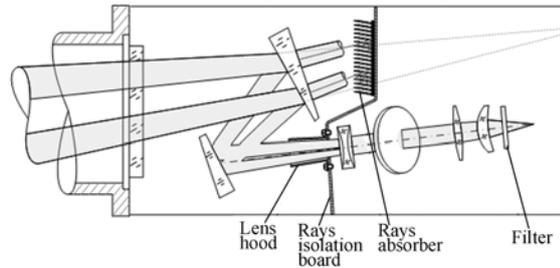


图 10 杂散光控制措施示意图

Fig. 10 Diagram of stray light controlling

除此之外,近背向散射光在经过光谱分离之后,系统还在(351±3) nm 短波支路和 400~700 nm 长波支路分别安装了滤色片。短波支路采用紫外高透的 ZWB2 玻璃滤波,它每毫米对(351±3) nm 波段的光透过率高达 92%,对 400~700 nm 波段的光的透过率小于千分之一。长波支路放置 527 nm 高反滤光片,以滤除光路中可能混入的二倍频打靶激光。

5 结 论

本文通过分析激光聚变中近背向散射光的收集方式,基于神光-III 主机装置提出了采用金属椭球镜收集近背向散射光的方案。该方案光路排布灵活,集光效率高,有利于提高近背向散射光能量测量的准确度;反射镜采用拼接方式,使之能够进入小入口的靶室;通过三角形减重槽实现了轻量化设计,保证了金属椭球镜的机械稳定性;研制了激光阵列装置,通过严格控制研制过程,实现了粗糙金属镜面的面形检验,避免了工序反复。最后分析了系统杂散光的来源,采取了物理隔离、光学吸收、过滤等消除杂散光的措施。本文研制的近背向散射诊断系统较好地满足了神光-III 主机背向散射诊断的需求,对研制大口径、大离轴量的金属反射镜具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 许琰,赖东显,冯庭桂,等. 黑腔诊断堵口现象的数值模拟[J]. 强激光与粒子束,2001,13(2):173-176.
XU Y, LAI D X, FENG T G, *et al.*. A model to study the transmissivity of diagnostic holes on hohlraum[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001,13(2):173-176. (in Chinese)
- [2] 郑志坚,陈家斌,丁永坤,等. 强激光斜入射半腔靶能量注入率测量[J]. 强激光与粒子束,2000,12(1):43-47.
ZHENG ZH J, CHEN J B, DING Y K, *et al.*. The laser energy injection efficiency measurement for the half-cavity target[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000,12(1):43-47. (in Chinese)
- [3] 况龙钰,王传珂,王哲斌,等. 527nm激光辐照盘受激布里渊散射光角分布[J]. 强激光与粒子束,2007,19(3):413-416.
KUANG L Y, WANG CH K, WANG ZH B, *et al.*. Angular distribution of stimulated Brillouin scattering from interaction of 527 nm laser with Au and Al disk targets[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007,19(3):413-416. (in Chinese)
- [4] KIRKWOOD R K, BACK C A, BLAIN M A, *et al.*. Imaging backscattered and near to backscattered light in ignition scale plasmas[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997,68(1):636-640.
- [5] MOODY J D, DATTE P, KRAUTER K, *et al.*. Backscatter measurements for NIF ignition targets[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010,81(10):10D921-1-6.
- [6] 王传珂,杨正华,刘慎业,等. 基于神光III原型装置的近背向散射诊断系统设计[J]. 核电子学与探测技术,2008,28(5):888-890.
WANG CH K, YANG ZH H, LIU SH Y, *et al.*. Design of near backscattering diagnosing system on Shenguang III prototype[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2008, 28(5): 888-890. (in Chinese)
- [7] 杨正华. 近背向散射与全孔径背向散射测量系统的研制[D]. 重庆:重庆大学,2008.
YANG ZH H. *The Study of Near Backscatter and Full-aperture Backscatter Measurement System* [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008. (in Chinese)
- [8] 王美聪,陈刚,黄湛,等. 神光III主机装置编组站稳定性设计[J]. 光学精密工程,2011,19(11):2664-2670.
WANG M C, CHEN G, HUANG ZH, *et al.*. Stability design of switchyard in SGIII facility[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(11):2664-2670. (in Chinese)
- [9] 董科研,王健,孙强,等. 机载双视场中波红外光学系统优化设计[J]. 中国光学,2012,5(6):596-601.
DONG K Y, WANG J, SUN Q, *et al.*. Design of an airborne dual field of view middle wave infrared optical system[J]. *Chinese Optics*, 2012,5(6):596-601. (in Chinese)
- [10] 宋家宝,李国平. 大型光学望远镜扇形子镜拼接设计及仿真分析[J]. 天文研究与技术,2010,7(4):355-361.
SONG J B, LI G P. Design and simulation of splicing of sector-shaped segments of a large optical telescope[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010,7(4):355-361. (in Chinese)
- [11] 张容,韩建军,臧友竹,等. 大型太阳模拟器拼接准直镜技术[J]. 航天器环境工,2005,22(1):50-56.
ZHANG R, HAN J J, ZANG Y ZH, *et al.*. Technology of segmented collimating mirror in a large solar simulator[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2005,22(1):50-56. (in Chinese)
- [12] 杨秉新. 空间相机用碳化硅(SiC)反射镜的研究[J]. 航天返回与遥感,2003,24(1):15-18.
YANG B X. Research of SiC reflection mirror for space camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003,24(1):15-18. (in Chinese)
- [13] 王贵林,李圣怡,戴一帆. 空间相机SiC反射镜的制作[J]. 机械工程材料,2002,26(8):37-38.
WANG G L, LI SH Y, DAI Y F. Fabrication of SiC mirrors applied to space camera[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 2002,26(8):37-38. (in Chinese)
- [14] 张学军,李志来,张忠玉. 基于SiC材料的空间相机非球面反射镜结构设计[J]. 红外与激光工程,2007,36(5):577-582.
ZHANG X J, LI ZH L, ZHANG ZH Y. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007,36(5):577-582. (in Chinese)

- [15] 陈伟,丁亚林,惠守文,等. 碳化硅扫描反射镜支撑结构设计[J]. 中国光学,2012,5(2):161-166.
CHEN W, DING Y L, HUI SH W, *et al.*. Design of kinematic mount for SiC scanning reflective mirror[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2):161-166. (in Chinese)
- [16] 徐新行,王兵,乔健,等. 快反系统中平面反射镜的轻量化设计[J]. 中国光学,2012,5(1):35-41.
XU X H, WANG B, QIAO J, *et al.*. Lightweight design of mirror in fast-steering mirror system[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1):35-41. (in Chinese)
- [17] 田铁印,王红,冯晟杰. 三线阵测绘相机光学系统的杂散光分析与计算[J]. 中国光学,2012,5(6):583-589.
TIAN T Y, WANG H, FENG H J. Analysis and calculation on stray light of three line array mapping camera[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):583-589. (in Chinese)

作者简介:



闫亚东(1979—),男,河南周口人,副研究员,2008年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事强激光精密诊断与应用技术的研究。
E-mail:yyd@opt.ac.cn



何俊华(1968—),男,江西人,研究员,博士生导师,1998年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位,主要从事水下光电成像与探测技术,强激光精密诊断与应用技术的研究。E-mail:hjh@opt.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)