

ICF 靶场中光束口径与列阵间隔的研究*

王聪瑜 刘志刚 庞向阳 汤更秀 朱健强

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 从靶场反射镜架模块的机械结构设计布局所需几何空间的角度出发, 根据大口径、列阵器件的特殊要求, 给出符合“神光 III”装置总体技术要求的 ICF 靶场光束口径与列阵间隔之间的关系, 得出靶场 $\Delta_{纵}$ 、 $\Delta_{横}$ 应满足的公式。

关键词 ICF 靶场; 光束口径; 列阵间隔; $\Delta_{纵}$; $\Delta_{横}$

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

0 引言

根据国际上惯性约束聚变(ICF)靶物理研究的实验数据和模拟计算的结果, 用 1~2 mJ 的短波长激光可间接驱动靶点火并能获得适中的增益(10~20), 用 5~10 mJ 的驱动器能实现高增益, 聚变产额可望达到 1000 mJ。为实现大能量、高功率的激光输出, 世界上主要的大型 ICF 装置大都采用多路激光同时入射靶室, 照射靶丸的方案, 例如美国正在建造的“国家点火装置”就采用了 192 束激光以获得 1.8 mJ 的激光输出^[1]。

目前, 我国“神光-III”主机共采用 64 路激光光束, 为保证“神光-III”装置总体排布合理, 缩小装置体积, “神光 III”主机中采用 4×2 列阵结构作为基本束组来排布激光光束, 光束列阵间隔的合适与否, 对激光器的关键单元如片状放大器模块、空间滤波器模块^[2]、靶场大口径反射镜模块等等的结构设计排布及优化有较大影响^[3]。本文以靶场反射镜架模块的设计来讨论靶场中光束口径与列阵间隔间的关系。

1 “神光-III”原型靶场反射镜架设计中遇到的问题

“神光-III”原型装置在总体结构上采用 4×2 列阵结构, 通过原型装置的总体机构设计, 发现在靶场大口径反射镜架模块、放大器模块、空间滤波器等功能模块的设计中, 4×2 列阵结构中各光束间的纵向间距与横向间距的选择对机构尺寸、机构原理方案等方面的选择有较大的限制。“神光-III”原型装置中激光束到达靶场时的单光束口径为 300 mm×300 mm, 由于物理实验的需求, 需将主放大级输出的八束光编组、对称排列等光程立体传输, 以 45°角入射真空靶室, 因此每束光需经过若干拐角点才能

最终到达靶室, 在每个拐角点上均放置一块反射镜, 安装角度分别有 45°、11.25°、33.75°、22.5°这几类, 其中以 45°角放置的光束截面积最大, 即为传输光束所需的反射镜面积最大, 结构设计所需空间及列阵间隔也最大, 因此以下分析都针对 45°的情况进行。

在“神光-III”原型装置中该反射镜片的尺寸为 540 mm×340 mm×60 mm, 由于“神光-III”原型装置光束纵向中心间距为 360 mm, 因此在分束对打时, 两块以 45°角相对放置的反射镜片切角后之间的裸镜距离只有 10 mm, 见图 1。如此狭小的空间位置对于在结构上保证反射镜使光束按预定方向传输以及保证光束质量起到了很大的限制。合理的控制光束口径与列阵间隔之间的关系对于采用合理的镜架结构, 从而保证靶场反射镜架模块有效的传输光束, 降低反射镜片的变形^[4]以及高效安全的更换反射镜模块都有着十分重要的作用。

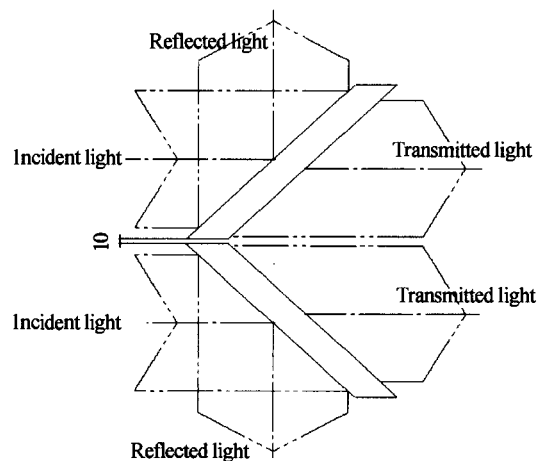


图 1 反射镜片放置
Fig. 1 View of two reflectors in the place

2 靶场光束口径与列阵间隔关系的推导

根据“神光-III”主机的光束形状, 设所要传输的光束为正方形口径光束, 其光束口径的边长为 a , 反

* 国家 863-804-5 计划 (No. 2004AA845021) 资助项目
Tel: 021-69918280 Email: wcy002@21cn.com
收稿日期: 2004-10-15

射镜片在 45°角工作时光束的传播如图 2,因此为保证反射镜片在 45°角工作时光束的全口径通光、光束折射、反射镜片在镜框中的固定以及反射镜片的变形,镜片的长度 L 和厚度 t 的选择应遵守下列条件:

1)为减小反射镜片的自重变形,从经验公式来说,镜片的长度 L 与厚度 t 大致满足关系

$$t \geq 1/8L \tag{1}$$

2)根据图 2,反射镜片的长度 L 应该满足关系

$$L \geq \sqrt{2}a + t + 10\sqrt{2} + 10 \tag{2}$$

式中 $10\sqrt{2}\text{mm}$ 是为保证有效光束口径的让边,以减小应力变形对有效通光口径内的镜面面形的影响; 10mm 为反射镜两侧所需的机械压边.

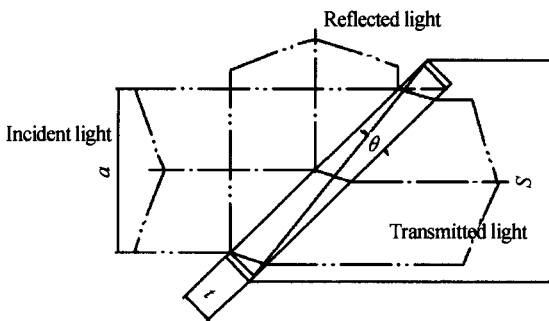


图 2 单面反射镜片
Fig. 2 Plan view of a reflector

由上述关系可以确定单面反射镜片 45°角斜放置时所占据的纵向空间距离 S 为

$$S = (\sqrt{L^2 + t^2}) \times \sin(45^\circ + \theta) \tag{3}$$

式中

$$\theta = \arctan(t/L) \tag{4}$$

以上为单独考虑反射镜片的情况.

3)靶场光束阵列间隔的纵向间距 $\Delta_{纵}$

图 3 为两块上下相对各 45°放置的反射镜,在靶场光束阵列间隔的纵向间距 $\Delta_{纵}$ 一定的情况下,这种相对位置关系是两块反射镜之间空间最紧凑的.因此, $\Delta_{纵}$ 如能满足该镜架结构设计所需的纵向空

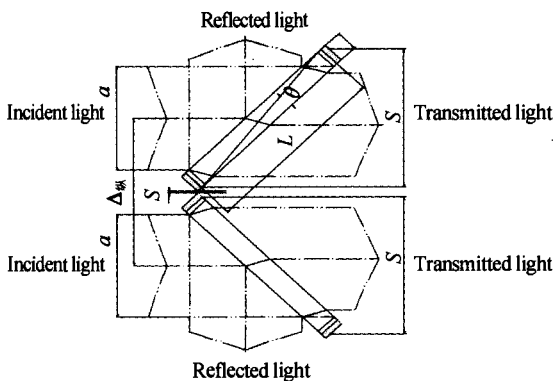


图 3 反射镜上下位置放置主视图
Fig. 3 Front view of two reflectors in up and down place

间,就能满足靶场其它镜架的纵向间隔.

另外,由于反射镜片必须安放在反射镜片过渡框内,因此靶场光束阵列间隔的纵向间距必须提供反射镜片过渡框的结构设计空间,从反射镜片的自重和反射镜片的装校角度考虑,为保证反射镜片过渡框的强度和减小反射镜片过渡框的变形,反射镜片过渡框的厚度一般应在 $15\text{mm} \sim 20\text{mm}$ 之间(采用硬铝材料),同时考虑到反射镜片过渡框的安装操作空间,每两个反射镜片过渡框之间的间距应该大于 5mm .

从以上种种因素可以得出,靶场光束阵列间隔的纵向间距 $\Delta_{纵}$ 应该满足以下关系,即

$$\Delta_{纵} \geq S + 2 \times (15/\sqrt{2}) + 5 \tag{5}$$

式中: $15/\sqrt{2}\text{mm}$ 为反射镜片过渡框结构设计所需厚度占据的纵向空间距离; 5mm 为反射镜之间的距离.

根据式(1)、(2)、(3)、(4)、(5),设光束口径边长 a 为 300mm ,反射镜厚度 t 为 60mm ,可以得出

$$L \geq 508.4\text{mm}$$

$$S \geq 401.86\text{mm}$$

$$\Delta_{纵} \geq 428.1\text{mm}$$

在神光 III 原型装置中,为减小反射镜片 45°角斜放置时所占据的纵向空间距离,反射镜片的形状采用了棱形结构,如图 1. 为此,单面反射镜片 45°角斜放置时所占据的纵向空间距离 S 变为

$$S = (\sqrt{L^2 + t^2}) \times \sin(45^\circ + \theta) - t \cdot \sin 45^\circ \tag{6}$$

式中: $L=540\text{mm}$, $t=60\text{mm}$

$$\text{所以 } S=383.9\text{mm}$$

$$\Delta_{纵} \geq 410.1\text{mm}$$

从以上的分析可以得出原型光束间的纵向间距 360mm ,对机构设计尺寸、机构原理方案、安装维护能否实现方便快捷等方面的选择及优化有较大的限制.

4)靶场光束阵列间隔的横向间距 $\Delta_{横}$

图 4 为两块左右相邻均 45°放置的反射镜,这种位置排布,对靶场光束阵列间隔的横向间距 $\Delta_{横}$ 的

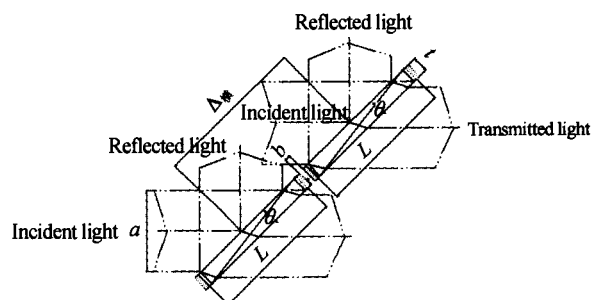


图 4 反射镜左右位置放置俯视图
Fig. 4 Plan view of two reflectors in right-and-left place

要求最大. 因此, $\Delta_{纵}$ 如能满足该镜架结构设计所需的横向间隔, 就能满足靶场其它镜架的横向布局.

从图 4 知, $\Delta_{横}$ 应满足以下关系, 即

$$\Delta_{横} \geq L + 2 \times 15 + b \quad (7)$$

式中, 15 mm 为镜框厚度. 而 b 则受多方因素影响, 例如是否需要角度调整机构, 如需要那么调整机构的方式、调节的范围等等, 对 b 都会产生影响. 另外, 由于光束传输距离长、角漂等影响, 两光束之间不能保证严格平行, 因此应适当放宽 b 的尺寸, 防止光束即使存在一定的小角度, 长距离传输后在空间上仍不会发生干涉.

3 结论

本文从靶场反射镜架结构设计布局所需几何空间的角度出发, 根据大口径、列阵器件的特殊要求, 分析了 ICF 靶场光束口径与列阵间隔之间的关系, 得出 $\Delta_{纵}$ 、 $\Delta_{横}$ 应满足的公式: $\Delta_{纵} \geq S + 2 \times (15/\sqrt{2}) + 5$, 其中 S 为单面反射镜片 45° 角斜放置时所占据的纵向空间距离; $\Delta_{横} \geq L + 2 \times 15 + b$, 其中 L 为反射镜片的长度, b 则受多方因素影响.

在此, 激光器列阵间隔与光束口径之间的关系

只考虑了靶场反射镜架模块的设计对激光器列阵间隔的影响, 另外还受到空间滤波器结构、主放大器结构等物理和设计等因素的影响, 应在综合这些因素后才能根据激光器的光束口径选择出合理的激光器列阵间隔.

参考文献

- 1 Paisner J A, Boyes J D, Kumpan S A, et al. The National Ignition Facility Project, *ICF Annual Report 1995*, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-LR-105820-95, 1996. 110~118
- 2 谢虎, 戴亚平, 张全慧, 等. 成组设计在高功率激光装置中的应用. *光子学报*, 2000, **29**(4): 367~369
Xe H, Dai Y P, Zhang Q H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(4): 367~369
- 3 Tietbohl G L, Sommer S C. Stability Design Considerations for Mirror Support Systems in ICF Lasers, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, UCRL-JC-125396, 1996. 1~6
- 4 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. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(8): 752~754
Sun F, Cheng Z H, Zhang Y N, et al. *High Power Laser And Particle Beams*, 2003, **15**(8): 752~754

Study on Beam Aperture and Space Array in ICF Target Area

Wang Congyu, Liu Zhigang, Pang Xiangyang, Tang Gengxiu, Zhu Jianqiang

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

Received date: 2004-05-19

Abstract Beam aperture and space array in ICF target area are researched. Based upon the geometrical space required by the machining design of the reflector module in target chamber as well as the special requirements of large aperture and alignment devices, the relationship between beam aperture and space alignment in ICF target area, which is suitable for the general technical requirement of SG-III, facility is discussed. The equation that $\Delta_{vertical}$ and $\Delta_{horizontal}$ should satisfy is derived.

Keywords ICF; Target area; Beam aperture; Space alignment; Δ_v ; Δ_h



Wang Congyu was born in 1977 in Zhejiang Province. She studied in Hefei University of Technology from 1995 to 1999 and received B. S. degree. Now she is working and studying in Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics. Her research interests mainly include the whole structure of High Power Lasers and Physics and fine mechanics design.