

用于烧蚀过程界面轨迹测量的球面弯晶成像系统

陈伯伦^{1**}, 杨正华^{1,2}, 李晋¹, 胡昕¹, 陈忠靖¹, 王峰^{1†}¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;²四川大学原子与分子物理研究所, 四川 成都 610065

摘要 在基于大型激光装置的惯性约束聚变实验研究中,球面弯晶成像是一种能够实现准单能高分辨成像的测量技术。采用类点投影的高分辨背光排布设计,在万焦耳级神光系列激光装置中,球面弯晶成像系统被应用于流体力学不稳定性及内爆压缩流场等多种激光等离子体实验研究中。在球形样品烧蚀压缩过程界面轨迹测量应用中,球面弯晶成像具有大视场、准单色和背光分布自匀滑等优势。在不改变成像系统排布参数的条件下,通过对成像参数的设计优化,平衡了子午方向和弧矢方向分辨率对一维界面轨迹测量的影响。在使用具有更大尺寸的背光源条件下,实现了界面轨迹吸收图像空间分辨率的提高,并且有效提升了图像的信噪比。将优化的球面弯晶成像系统与替代靶设计相结合,实现了 2.1% 的内爆速度测量精度。

关键词 X 射线光学; 等离子体物理; 激光等离子体; 界面轨迹; 球面弯晶

中图分类号 O539

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134012

Spherically Bent Crystal Imaging System for Interface Trajectory Measurement During Ablation

Chen Bolun^{1**}, Yang Zhenghua^{1,2}, Li Jin¹, Hu Xin¹, Chen Zhongjing¹, Wang Feng^{1†}¹Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;²Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China

Abstract Spherically bent crystal imaging is a measurement technique that can be used to achieve quasi-monochromatic high-resolution imaging in experimental studies of inertial confinement fusion based on high power laser facilities. With a high-resolution backlight arrangement design similar to that of point projection, the spherically bent crystal imaging system developed is applied to 10 kJ-level Shenguang facilities for hydrodynamic instability, implosion compression trajectory, and other experimental studies of laser-induced plasmas. When it is applied to interface trajectory measurement during the ablation and compression of spherical samples, the spherically bent crystal imaging has the advantages of a large field of view, quasi-monochromaticity, and self-smoothing of backlight intensity distribution. The influences of the resolution in the meridian direction and that in the sagittal direction on one-dimensional interface trajectory measurement are balanced by optimizing imaging parameter design without changing the arrangement parameters of the imaging system. Even with a larger backlight, the spatial resolution of the interface trajectory absorption image is improved, and the signal-to-noise ratio of the image is also effectively enhanced. An accuracy of 2.1% is achieved in implosion velocity measurement by combining the optimized spherically bent crystal imaging system with the alternative target design.

Key words X-ray optics; plasma physics; laser plasma; interface trajectory; spherically bent crystal

收稿日期: 2022-03-08; 修回日期: 2022-03-29; 录用日期: 2022-04-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA04033)

通信作者: *wangfeng7566@163.com; **blchen@mail.ustc.edu.cn

1 引言

球面弯晶成像是一种基于 X 射线 Bragg 衍射, 利用球面面形的弯晶实现类球面镜成像排布的成像技术。在 20 世纪 30 年代, 研究人员已经开始探索球面弯晶成像技术在激光等离子体实验中的应用^[1]。在小型激光装置中, 成像系统排布更为自由, Aglitskiy 等^[2]对接近正入射的高分辨成像排布、更小 Bragg 角的等放大成像排布等多种排布设计形式开展了成像测试。直到近几年, 球面弯晶成像技术才真正在万焦级、兆焦级大型激光装置上被应用于实验测量中。在这些装置中, 成像系统需要搭载在诊断搭载平台上^[3], 安装空间受到了限制, 同时物理实验也对成像的空间分辨率有较高的要求, 因此弯晶成像系统都采用了近正入射的高分辨成像排布设计。球面弯晶成像能够被用于一维光谱测量^[4]、二维单色自发光成像测量^[5-6]和二维背光成像测量中。由于单个球面镜并非理想成像元件, 因此基于球面弯晶的二维自发光成像需要 Bragg 角非常接近 90° 以降低偏轴像差, 这限制了球面弯晶成像的应用。同时, 相比其他成像方式, 除了单色性大幅提升外, 二维自发光成像并没有明显的优势。

球面弯晶二维背光成像排布采用类点投影排布设计, 在成像视场、分辨均匀性和背光自匀滑等方面, 相比面背光排布的针孔成像、Kirkpatrick-Baez (KB) 成像^[7-8]等显微成像方式更适合开展吸收成像测量, 晶体极高的能谱分辨率也在自发发射背景的抑制方面具有明显优势。本文介绍了应用于神光系列激光装置的球面弯晶成像系统的设计

和球面弯晶成像系统在流体力学不稳定性测量^[9-10]、内爆烧蚀压缩轨迹测量^[11-12]中的应用。在不改变成像系统设计的前提下, 通过背光参数优化进一步实现针对烧蚀压缩过程轨迹测量的一维高分辨背光成像优化设计, 有效提升了成像的信噪比和空间分辨率。

2 球面弯晶成像系统设计

2.1 球面弯晶背光成像原理

球面弯晶成像光路基于球面镜成像光路设计。子午方向和弧矢方向分别满足的物象关系^[2]为

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_m} = \frac{2}{R \sin \theta}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_s} = \frac{2 \sin \theta}{R}, \quad (2)$$

式中: p 是物距; q_m 和 q_s 分别是子午方向和弧矢方向的像距; θ 是 Bragg 角; R 是球面弯晶的曲率半径。在成像排布中, Bragg 角越小, 即入射角越大, q_m 和 q_s 的偏差越大。在自发光成像应用中, Bragg 角越小, 意味着像差越大。因此, 当采用球面弯晶自发光成像设计时, 需要 Bragg 角接近 90° , 此时 $\sin \theta \approx 1$, 进而 $q_m \approx q_s$, 实现了傍轴条件下的近理想成像。提升成像空间分辨率和降低成像像差的另一种途径是减小成像系统的有效数值孔径, 球面弯晶背光成像排布就是源于这种设计原理。在背光成像排布中, 样品放置在背光源和晶体之间, 样品与晶体间的距离为 a , 记录系统与晶体间的距离为 b 。球面弯晶背光成像原理光路图如图 1 所示, 其中 F_m 为子午方向散焦线, F_s 为弧矢方向散焦线。

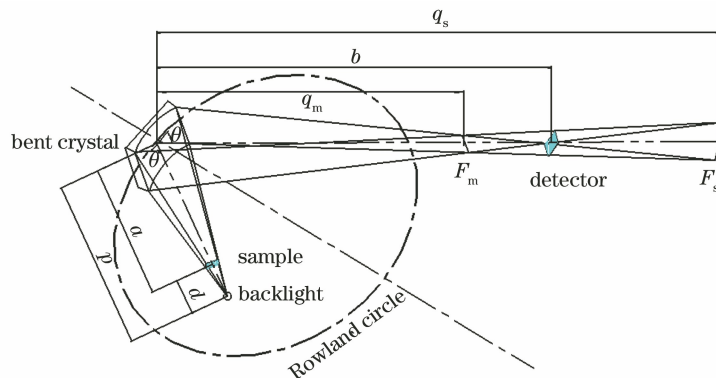


图 1 球面弯晶背光成像原理光路图

Fig. 1 Principle optical path diagram of backlight imaging using spherically bent crystal

在背光成像排布中, 物体的成像关系仍然满足式(1)和式(2)。探测器放置在物体子午方向和弧矢方向散焦线的中间位置, 保证两维的分辨率接近。

在成像排布参数中, Bragg 角与晶体的晶向和背光材料特征发射谱线的波长相互匹配, 满足 Bragg 衍射条件。与自发光成像设计相比, 此时样品有效的

收光角与 d (背光源和样品的距离) 和 d_s (背光源的尺寸) 相关。按照瑞利判据, 球面弯晶背光成像系统子午方向和弧矢方向的空间分辨率^[13] 可以表示为

$$\sigma_m = \left| \frac{aR \sin \theta - 2ab + bR \sin \theta}{2(a+d) - (a+d+b)R \sin \theta} \right| \times d_s, \quad (3)$$

$$\sigma_s = \left| \frac{aR - 2ab \sin \theta + bR}{2(a+d)b \sin \theta - (a+d)R - bR} \right| \times d_s. \quad (4)$$

在背光成像排布中, 两维的空间分辨率与光源的尺寸成正比, 与光源到样品的距离近似反比, 意味着光源尺寸越小, 背光源距离样品越远, 系统的成像分辨率越高, 因此球面弯晶高分辨背光排布实质上是一种点投影排布。在传统的点投影排布中, 微点 X 射线源产生的 X 射线直接透过样品, 在记录面位置形成放大的显微图像, 图像的空间分辨率与 X 射线源的尺寸相当。与传统点投影排布相比, 球面弯晶背光成像光路中增加了成像器件 (球面弯晶), 球面弯晶的聚焦特性修正了空间分辨率对背光源距离和尺寸的依赖关系, 能够在更大光源尺寸和更近背光距离条件下获得高空间分辨率图像, 降低了在

激光装置中应用的难度。通常情况下背光源的最大距离和最小尺寸会受到激光装置光束调节范围和激光焦斑尺寸限制。

2.2 神光系列激光装置球面弯晶成像系统设计

在大型激光装置上, 诊断系统通常安装在诊断搭载平台 (DIM) 上, 通过诊断搭载平台伸入靶室, 开展实验测量。球面弯晶成像系统在大型激光装置上开展应用的主要难点是在满足近正入射条件下, 背光源特征谱线与晶体晶向的匹配、复杂靶室环境下的成像排布优化和光路校准。近两年, 在 Omega 和美国国家点火设施 (NIF) 中, 球面弯晶成像系统被用于靶丸背光成像测量。2012 年起, 神光系列激光装置已经将球面弯晶成像系统应用于内爆烧蚀压缩过程界面轨迹的测量中。近两年, 通过一体化设计和特征谱在线校准方法的优化, 该成像系统逐步被应用于流体力学不稳定性及辐射冲击波轨迹测量等实验中。

球面弯晶成像系统是反射式成像系统, 成像元件 (球面弯晶) 和记录系统分别位于样品的两侧。为保证系统主光路的定位精度, 系统采用一体式设计, 成像晶体通过连接架机械结构与记录系统集成, 搭载在同一个诊断搭载平台上, 如图 2 所示。

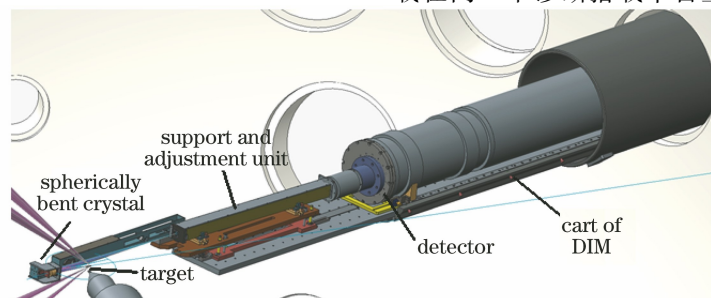


图 2 神光系列激光装置球面弯晶系统设计示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spherically bent crystal imaging system for Shenguang laser facilities

在反射光路中, 设置了用于屏蔽靶点直穿 X 射线和环境散射 X 射线的屏蔽飞行管, 前端位于背光源子午焦线位置。同时, 设置了光阑, 该光阑决定了系统的数值孔径, 能够起到屏蔽非背光源背景发射干扰的作用。飞行管的末端位于记录面前一段距离处, 通过波纹管与记录设备相连。采用这种设计, 能够同时适配用于二维成像测量的电荷耦合器件

(CCD) 记录系统和用于一维时间分辨测量的条纹相机记录系统^[14], 以保证记录系统有效的灵敏面位于相同的最佳成像位置处。综合考虑了系统的空间分辨需求、放大率需求和搭载平台的容纳空间, 系统的设计参数如表 1 所示。其中, FoV 是成像系统的视场, 指在物平面成像区域的大小, 主要由背光源与样品的距离 d 和球面弯晶的口径决定。

表 1 球面弯晶成像系统的设计参数

Table 1 Design parameters of spherically bent crystal imaging system

Orientation of crystal	R / mm	$\theta / (^{\circ})$	d / mm	a / mm	b / mm	FoV / (mm × mm)
Quartz 21-33	250	83.1	20	135	1695	1.3 × 1.3

在表 1 所示的成像参数设计下, 成像的空间分辨率和放大率如 3 图所示。其中, M_m 为子午方向

放大率, M_s 为弧矢方向放大率。

从图 3 中可以看出, 成像系统记录面位于两维

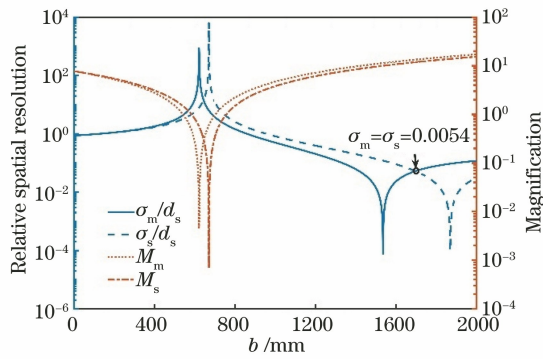


图 3 球面弯晶成像系统的空间分辨率和放大率

Fig. 3 Spatial resolution and magnification of spherically bent crystal imaging system

分辨率相近的位置,从而可实现两维高分辨单能成像^[15]。在采用直径为 200 μm 的钒背光源条件下,

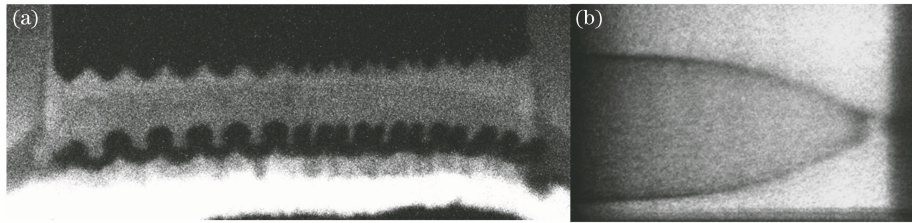


图 4 神光系列装置中基于球面弯晶的成像测量结果。(a)流体力学不稳定性实验测量结果;(b)内爆压缩流线测量结果

Fig. 4 Imaging measurement results based on spherically bent crystal in Shenguang laser facilities. (a) Measurement result of hydrodynamic instability experiment; (b) measurement result of implosion compression trajectory

3 压缩轨迹测量的一维高分辨优化设计

3.1 成像参数优化和系统仿真

将球面弯晶成像系统应用于内爆烧蚀压缩轨迹测量中,采用具有一维时间分辨、一维空间分辨的条纹相机作为记录系统。条纹相机的灵敏面是宽度约为 200 μm 的阴极材料。样品是球形的内爆靶丸。通过测量靶丸直径附近区域的吸收图像,可获得壳层的密度分布和内界面的运动轨迹。现有的球面弯晶成像系统兼顾了高分辨的二维背光成像和自发光成像等应用方式,能够被应用于更多的实验项目中。在背光成像应用中,通过增加背光源与样品的距离和减小背光源尺寸的方式限制有效集光立体角,达到提升两维空间分辨率的目的。针对内爆流线测量,在不改变成像系统排布的基础上,保持像距不变,通过改变物距来改变成像特征位置的选择,使得弧矢散焦线位于记录面位置处,此时成像性能参数如图 5 所示。

系统校准时将成像系统沿主光轴方向远离靶,由于物距的变化,故子午和弧矢两维的散焦线位置也会发生变化。调整弧矢方向散焦线的位置,使之

利用钒的类 He 特征发射可得到 5.21 keV 的成像能点,系统设计的子午方向和弧矢方向的空间分辨率均约为 10 μm。两维的放大率分别为 11.8 和 13.4,系统能量分辨率约为 5×10^{-3} 。由于受到晶体能谱分辨率的影响,子午方向的空间分辨率除了与背光源的尺寸相关外,还与晶体的扭摆曲线相关,故在实际应用中,子午方向的空间分辨率略优于设计值。在神光系列激光装置中,球面弯晶背光成像系统被应用于流体力学不稳定性和内爆烧蚀压缩流线等多种烧蚀压缩界面的吸收成像测量中,获得的准单能背光成像结果如图 4 所示^[16-17]。图 4 为准单能吸收图像,图像强度表征了样品透过率的变化,能够用于界面扰动或轨迹的测量,并可反演样品的密度分布信息。

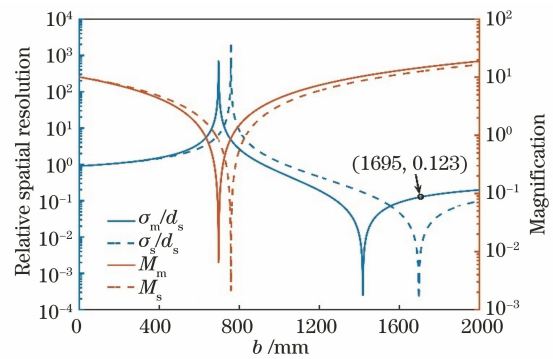


图 5 球面弯晶成像系统针对内爆流线测量的优化成像参数
Fig. 5 Optimized imaging parameters of spherically bent crystal imaging system for implosion trajectory measurement

距离晶体约 1695 mm,弧矢方向散焦线位于记录面位置处。此时,物距为 136 mm。同时,为提升背光的效率,利用靶设计减小了背光源与样品的距离。与原设计参数相比,物距变为 136 mm,背光源与样品的距离变为 15 mm,像距仍为 1695 mm。此时,系统弧矢放大率约为 12.5。优化设计下成像仿真结果如图 6 所示,其中图 6(a)是成像样品,图 6(b)是采用直径为 200 μm 的背光源时常规等分辨设计下的仿真结果,图 6(c)是采用直径为 200 μm 的背

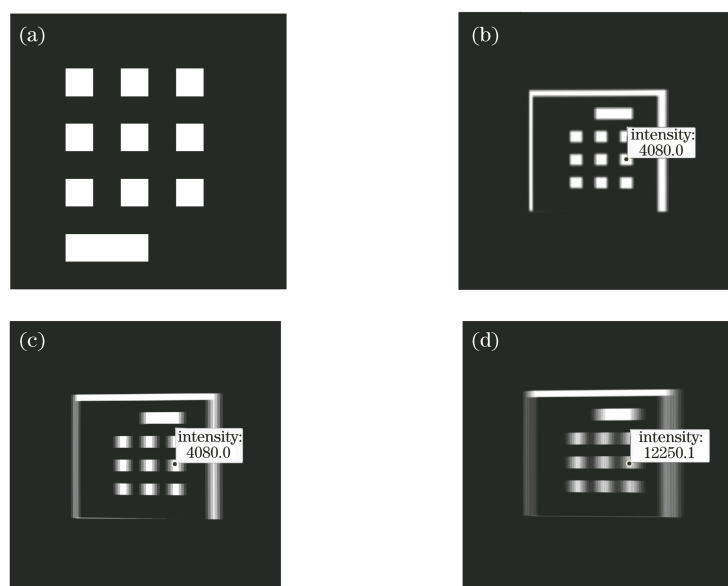


图 6 不同成像参数下球面弯晶成像系统的仿真结果对比。(a)成像样品;(b)采用直径为 $200\ \mu\text{m}$ 的背光源时常规等分辨率设计下的仿真结果;(c)采用直径为 $200\ \mu\text{m}$ 的背光源时一维优化设计的仿真结果;(d)采用直径为 $400\ \mu\text{m}$ 的背光源时一维优化设计的仿真结果

Fig. 6 Simulation results comparison of spherically bent crystal imaging system with different imaging parameters. (a) Imaging sample; (b) simulation result of conventional equal resolution design by using backlight with diameter of $200\ \mu\text{m}$; (c) simulation result of one-dimensional optimization design by using backlight with diameter of $200\ \mu\text{m}$; (d) simulation result of one-dimensional optimization design by using backlight with diameter of $400\ \mu\text{m}$

光源时一维优化设计的仿真结果,图 6(d)是采用直径为 $400\ \mu\text{m}$ 的背光源时一维优化设计的仿真结果。

与二维高分辨成像相比,在相同背光源尺寸下,优化后的设计虽然减小了背光源与样品的距离,但是弧矢方向空间分辨率仍明显高于常规设计,可以采用更大的背光源来提升有效信号的强度。改进设计下弧矢方向分辨率明显提高,但子午方向分辨率降低。采用直径为 $400\ \mu\text{m}$ 的背光源,弧矢方向分辨率变化不明显,仍优于 $2\ \mu\text{m}$,但子午方向明显变差,约为 $50\ \mu\text{m}$ 。球面弯晶成像由于两维焦距不同,形成了一阶球差,这是影响球面弯晶成像分辨的主导因素,因此式(1)和式(2)给出的分辨率主要是通过球差计算获得的。在子午焦线位置处,球差为焦线的长度,其对子午方向分辨率的影响可以忽略。收光角引起的慧差可以采用传统的像差分析方法获得,其对系统空间分辨率的影响可以忽略。在图 6 所示的模拟结果中,子午方向分辨率与式(1)和式(2)的计算结果接近,这也说明此时慧差的影响可以忽略,而中心区域附件的平均强度提升了约 3 倍。在内爆流线测量中,条纹相机灵敏面竖直放置,成像系统直径方向的空间分辨率优于 $2\ \mu\text{m}$,实际空间分

辨率由记录系统决定。在子午方向上,成像系统的空间分辨率约为 $50\ \mu\text{m}$,可以理解为对 $50\ \mu\text{m}$ 直径范围内的区域进行平均。在靶丸半径为 $375\ \mu\text{m}$ 的设计下,此范围模糊等效于弧高的尺寸,等效于直径方向约 $3.3\ \mu\text{m}$ 的有效分辨率。

靶丸模拟结果如图 7 所示,与网格模拟结果空间分辨率的变化是一致的。由于条纹相机阴极狭缝的宽度为 $200\ \mu\text{m}$,因此在像面图像选取子午方向中心区域 10 pixel 的范围进行平均,获得的透过率曲线如图 8。

从透过率曲线可以看出,相比常规等分辨设计,采用改进后的设计,放大率略微增大,中心透过率与常规设计一致,子午方向分辨率的降低未对结果产生明显影响。改进后的设计采用直径为 $400\ \mu\text{m}$ 的背光源,此时的透过率曲线与直径为 $200\ \mu\text{m}$ 的背光源情况无明显区别,说明有效分辨率没有明显降低。

3.2 实验测量结果

对弯晶成像系统的设计进行优化。在保持原系统机械设计不改动的前提下,改变背光源到样品的距离和样品到晶体的距离,将原来的二维高分辨设计改变为针对流线测量的一维高分辨设计。通过设计优化,采用更大尺寸的背光源,减少背光源到样品

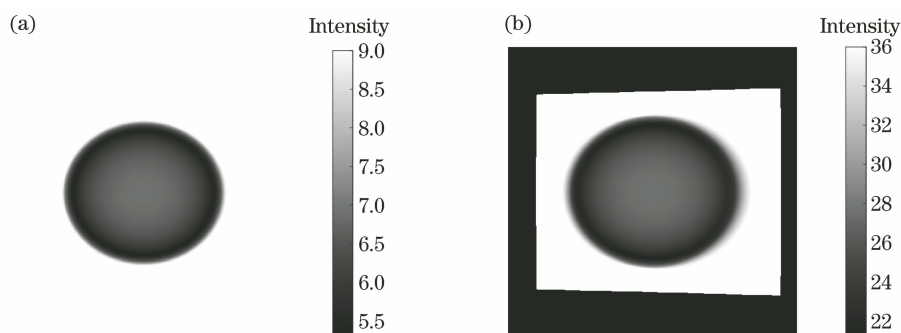


图 7 球面弯晶成像系统靶丸成像仿真结果对比。(a) 采用直径为 200 μm 背光源时靶丸成像仿真结果；(b) 采用直径为 400 μm 背光源时靶丸成像仿真结果

Fig. 7 Comparison of pellet imaging simulation results obtained by spherically bent crystal imaging system. (a) Simulation result of pellet imaging by using backlight with diameter of 200 μm ; (b) simulation result of pellet imaging by using backlight with diameter of 400 μm

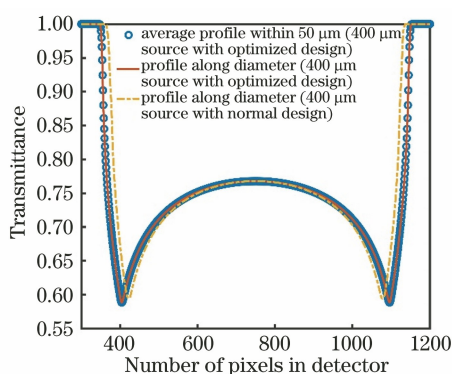


图 8 靶丸直径区域吸收图像透过率曲线

Fig. 8 Transmittance curve of pellet absorption image along diameter direction

的距离,优化背光束选择,提升信号强度,同时保证流线测量的高空间分辨率。在实验室中对成像系统进行了光路校准,在实验测量中,通过背光源、样品和记录面位置的多个标识点的复合,实现了系统装调误差小于 50 μm 的精度,系统装调误差对系统空间分辨率和能量分辨率的影响可以忽略^[10]。在实验中,背光片的直径为 400 μm ,较以往设计(200 μm)有所增大,同时成像系统分辨率优于 3.5 μm ,实际分辨率优于 5.0 μm (受记录系统分辨率影响),实验结果和预期是一致的,信噪比和空间分辨率都有一定提升。实验结果如图 9 所示。

图 9 水平方向是时间扫描方向,竖直方向给出对应时刻靶丸最大直径位置的吸收轮廓,从而给出靶丸压缩过程中靶丸直径区域透过率曲线随时间的变化。基于测量的吸收图像质量的提升,结合实验室校准和原位打靶标定结果,给出了内爆速度和剩余质量的分析结果。通过优化,图像的信噪比获得

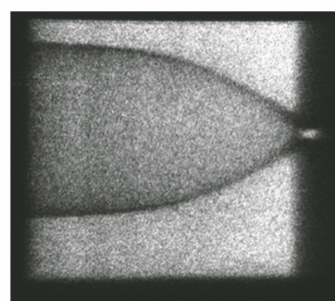


图 9 优化设计的弯晶成像系统流线测量结果

Fig. 9 Trajectory measurement result obtained by optimized spherically bent crystal imaging system

较为明显的改善,同时图像具有更高的有效空间分辨率,提升了靶丸飞行半径的反演精度,内爆速度测量精度达到了 2.1%。

4 结 论

球面弯晶成像是一种能够同时提供高空间分辨率和高能谱分辨率的 X 射线成像技术。在激光等离子体实验中,准单能的吸收成像结果对提升样品密度反演和界面轨迹测量的精度具有重要作用。采用类点投影排布的球面弯晶成像系统能够实现二维的等分辨测量,受球面镜像差的影响,需要通过减小背光源尺寸和增加背光源距离的方式提升分辨率。在内爆压缩流线测量应用中,基于二维分辨测量要求的不同,针对性地进行成像参数的优化,有效提升了实际图像的空间分辨率和信噪比。在实验中,获得了与设计符合的测量结果,提升了内爆压缩流线的图像质量。结合实验室校准和原位打靶标定结果,使内爆速度的测量精度达到了 2.1%,达到物理实验需求的测量精度,为内爆压缩动力学过程实验研究提供了重要的支撑。

参 考 文 献

- [1] Pikuz S A, Shelkovenko T A, Romanova V M, et al. Monochromatic X-ray probing of an ultradense plasma[J]. JETP Letter, 1995, 61: 638-644.
- [2] Aglitskiy Y, Lehecka T, Obenschain S, et al. High-resolution monochromatic X-ray imaging system based on spherically bent crystals [J]. Applied Optics, 1998, 37(22): 5253-5261.
- [3] 杨正华, 刘慎业, 曹柱荣, 等. 神光Ⅲ主机通用诊断搭载平台的研制 [J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(1): 115-120.
Yang Z H, Liu S Y, Cao Z R, et al. Development of Shenguang III facility general diagnostic instrument manipulator [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(1): 115-120.
- [4] 刘利锋, 肖沙里, 钱家渝, 等. 箍缩等离子体 X 射线能谱诊断 [J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s130004.
Liu L F, Xiao S L, Qian J Y, et al. X-ray spectral diagnosis for Z-pinch plasma [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s130004.
- [5] 姚立, 蒲昱东, 韦敏习, 等. 神光Ⅲ原型 X 射线荧光成像原理验证实验 [J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0634001.
Yao L, Pu Y D, Wei M X, et al. A proof-of-principle experiment demonstrating X-ray fluorescence imaging at the Shenguang-III prototype laser facility [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0634001.
- [6] 谭伯仲, 阳庆国, 杜亮亮, 等. 基于球面晶体的高光谱分辨全视场 X 射线荧光成像 [J]. 光学学报, 2019, 39(11): 1134001.
Tan B Z, Yang Q G, Du L L, et al. Spherical crystal based on X-ray fluorescence imaging with high spectral resolution and full field of view [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1134001.
- [7] 伊圣振, 穆宝忠, 王新, 等. 周期多层膜 Kirkpatrick-Baez 显微镜成像性质分析 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(11): 1681-1685.
Yi S Z, Mu B Z, Wang X, et al. Imaging characteristic analysis of Kirkpatrick-Baez microscope with periodic multilayer [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2009, 21(11): 1681-1685.
- [8] 王新, 穆宝忠, 伊圣振, 等. 非周期多层膜 Kirkpatrick-Baez 显微镜成像 [J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1553-1557.
Wang X, Mu B Z, Yi S Z, et al. Kirkpatrick-Baez microscope imaging with non-periodic multilayer films [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(7): 1553-1557.
- [9] Hammel B A, Haan S W, Clark D S, et al. High-mode Rayleigh-Taylor growth in NIF ignition capsules [J]. High Energy Density Physics, 2010, 6(2): 171-178.
- [10] Clark D S, Haan S W, Cook A W, et al. Short-wavelength and three-dimensional instability evolution in National Ignition Facility ignition capsule designs [J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(8): 082701.
- [11] Hicks D G, Spears B K, Braun D G, et al. Convergent ablator performance measurements [J]. Physics of Plasmas, 2010, 17(10): 102703.
- [12] Hicks D G, Meezan N B, Dewald E L, et al. Implosion dynamics measurements at the National Ignition Facility [J]. Physics of Plasmas, 2012, 19(12): 122702.
- [13] 陈伯伦, 韦敏习, 杨正华, 等. 球面弯晶的背光成像特性 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(3): 641-645.
Chen B L, Wei M X, Yang Z H, et al. Character of backlight imaging based on spherically bent crystal [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(3): 641-645.
- [14] 胡昕, 刘慎业, 丁永坤, 等. 神光Ⅲ主机 X 射线条纹相机设计 [J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2871-2875.
Hu X, Liu S Y, Ding Y K, et al. Design of SG-III X-ray streak camera [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2871-2875.
- [15] 陈伯伦, 杨正华, 韦敏习, 等. 神光Ⅱ激光装置 X 射线高分辨单色成像技术 [J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3119-3122.
Chen B L, Yang Z H, Wei M X, et al. High-resolution monochromatic X-ray imaging techniques applied to Shenguang II laser facility [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3119-3122.
- [16] Chen B L, Yang Z H, Wei M X, et al. Implosion dynamics measurements by monochromatic X-ray radiography in inertial confinement fusion [J]. Physics of Plasmas, 2014, 21(12): 122705.
- [17] 陈伯伦, 杨正华, 胡昕, 等. 神光系列激光装置内爆烧蚀压缩过程测量 [J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(9): 092010.
Chen B L, Yang Z H, Hu X, et al. Implosion ablated convergence measurement on Shenguang laser facilities [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(9): 092010.