



·惯性约束聚变物理与技术·

## 激光聚变极端环境下 X 光高速摄影技术研究进展

曹柱荣<sup>1</sup>, 王强强<sup>1</sup>, 邓 博<sup>1</sup>, 陈 韬<sup>1</sup>, 邓克立<sup>1</sup>, 王维荣<sup>2</sup>, 彭星宇<sup>3</sup>, 陈忠靖<sup>1</sup>,  
袁 铮<sup>1</sup>, 黎宇坤<sup>1</sup>, 王 鹏<sup>1</sup>, 陈伯伦<sup>1</sup>, 王 峰<sup>1</sup>, 何海恩<sup>1</sup>, 李欣竹<sup>2</sup>, 许泽平<sup>3</sup>,  
杨 冬<sup>1</sup>, 杨家敏<sup>1</sup>, 江少恩<sup>1</sup>, 丁永坤<sup>4</sup>, 张维岩<sup>5</sup>

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900; 3. 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900; 4. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094; 5. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 在激光惯性约束聚变(ICF)研究中,通过 X 光高速摄影获取的图像数据能够反映等离子体中由于做功和能量输运导致的流体状态的时空演化信息,与之相关的诊断技术与工程研究一直以来都是 ICF 诊断能力建设的重要组成部分。介绍了作为我国 ICF 工程的主要实施单位之一,中国工程物理研究院激光聚变研究中心近年来在 X 光高速摄影技术研究方面取得重要进展,包括:(1)面向神光系列激光装置,开发了系列工程化的 100 ps 曝光高速摄影相机,整体达到国际先进水平,并在高灵敏探测、透射式带通滤波和结构小型化等方面形成中国特色;(2)提出微扫描门控、同视扫描分幅等 10 ps 曝光 X 光高速摄影新技术,为突破时间分辨瓶颈做出有益尝试;(3)在国内率先开展抗辐射加固高速摄影相机理论设计、技术验证与工程设计;(4)针对激光聚变靶碎片对设备安全的威胁,在国内首次开展靶碎片的理论建模与仿真研究,并开展首次验证实验,取得重要进展。

**关键词:** 惯性约束聚变; X 光分幅相机; 高速摄影技术; 抗辐射加固; 靶碎片

中图分类号: TB872; TB873; TN151

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.200099

## Progress of X-ray high-speed photography technology used in laser driven inertial confinement fusion

Cao Zhurong<sup>1</sup>, Wang Qiangqiang<sup>1</sup>, Deng Bo<sup>1</sup>, Chen Tao<sup>1</sup>, Deng Keli<sup>1</sup>, Wang Weirong<sup>2</sup>, Peng Xingyu<sup>3</sup>,  
Chen Zhongjing<sup>1</sup>, Yuan Zheng<sup>1</sup>, Li Yukun<sup>1</sup>, Wang Peng<sup>1</sup>, Chen Bolun<sup>1</sup>, Wang Feng<sup>1</sup>,  
He Haien<sup>1</sup>, Li Xingzhu<sup>2</sup>, Xu Zeping<sup>3</sup>, Yang Dong<sup>1</sup>, Yang Jiamin<sup>1</sup>,  
Jiang Shaoen<sup>1</sup>, Ding Yongkun<sup>4</sup>, Zhang Weiyan<sup>5</sup>

(1. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China;

3. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, Mianyang 621900, China;

4. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100094, China;

5. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In the study of laser driven inertial confinement fusion (ICF), the image data obtained through X-ray high-speed photography technology can be used to analyze the spatial and temporal evolution of the plasma with fluid state produced by work and energy transport. The research of X-ray high-speed photography technology has always been an important part of the development of ICF diagnostics. The Laser Fusion Research Center of China Academy of Engineering Physics has made important progresses in the research of X-ray high-speed photography technology in recent years. These advances include: (1) making a success in developing the X-ray camera with 100ps exposure time for Shenguang laser facilities, which has reached the international advanced level as a whole, and is characterised in such aspects as high sensitivity, transmission-type band-pass filtering and miniaturized design; (2) proposing new types of X-ray high-speed photography technologies with 10 ps exposure time such as the micro-sweep gating technology to break the bottleneck of temporal resolution; (3) taking the lead in carrying out theoretical design,

\* 收稿日期: 2020-04-28; 修订日期: 2020-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(11675157; 11805180)

作者简介: 曹柱荣(1977—), 男, 硕士, 研究员, 从事激光核聚变诊断技术研究; cao33jin@aliyun.com。

technical verification and engineering design of the radiation-hardened X-ray high-speed camera in China; (4) making the efforts on modeling and simulation on target debris and carrying out the special experiments for the first time in China to verify the simulation results.

**Key words:** inertial confinement fusion; X-ray framing camera; high-speed photography technology; radiation protection; target debris

激光惯性约束聚变(ICF)是实现受控核聚变的重要途径之一,是对国家能源发展和国防建设等具有战略支撑意义的大科学工程<sup>[1-5]</sup>。ICF以高能脉冲激光作为驱动源,致力于在实验室中创建满足点火要求的热核等离子体而实现聚变能量的输出。ICF实验的具体过程为:用高能激光直接或间接驱动ICF实验靶,直接驱动中激光直接辐照装填有DT燃料的靶丸,而间接驱动中激光被注入特定构型的黑腔中并与腔壁相互作用,激发X光辐射再去辐照靶丸;在激光或X光的烧蚀下靶丸表层物质消融、喷离并产生巨大的反冲压力,压缩燃料至极端高温高压状态,达到点火条件。要实现点火,需要实现对靶丸30倍以上收缩比的内爆压缩,对应的燃料峰值温度超过 $1 \times 10^8$  °C,峰值压力超过 $10^{10}$  MPa<sup>[1-3]</sup>,这样的极端物态只能存在于恒星内部。提高激光能量的利用效率及在压缩中尽量保持靶丸的球对称特征是实现点火的关键。然而在高收缩比内爆中,任何微小的缺陷都可能被放大,最终影响内爆完整性并导致点火失败。由于对各种缺陷的影响机制的认识不够深入,尽管美国国家点火攻关(NIC)<sup>[6]</sup>已经结束,人类依然没有实现激光聚变点火这一宏伟的科学目标。当前,通过进一步深化物理认知从而最大限度控制实验缺陷来逼近点火条件已经成为ICF研究界的共识。

研究者对ICF极端物理的认识,除了部分来源于模型预测外,大部分都来源于实验诊断。在某种程度上,诊断技术的精度决定了物理认知的深度。ICF实验包含了各种各样的诊断配置<sup>[7-8]</sup>,其中成像式诊断技术,特别是X光高速摄影诊断技术具有特别的重要性。通过X光高速摄影获取的X光图像数据可直接反映等离子体中由于做功和能量输运导致的流体状态的时间及空间演化信息,如果配以X光能谱选择技术,还能提供光谱信息。这些同时蕴含时间、空间和光谱信息的图像数据对研究者理解物理内涵、优化实验设计及校验理论模型具有不可替代的重要作用。

由于X光高速摄影诊断技术在ICF研究中发挥着至关重要的作用,与其相关的原理创新、技术突破和工程研制等一直以来都是ICF诊断能力建设的重要组成部分。近年来,在NIC计划的牵引下,美国已经建立完备的X光高速摄影诊断配置;中国科学院西安光学精密机械研究所、深圳大学等国内优势单位在X光高速摄影相机研发方面也取得重要进展;中国工程物理研究院激光聚变研究中心是我国ICF大科学工程主要实施单位之一,近年来围绕ICF诊断需求在X光高速摄影诊断技术领域开展了多方面的研究工作。本文首先从黑腔物理实验研究和内爆物理实验研究两个方面论述ICF实验工程对X光高速摄影诊断技术的需求,进而讨论X光高速摄影技术面临的挑战,在此基础上介绍国内外X光高速摄影技术研究进展,并重点介绍中国工程物理研究院激光聚变研究中心在X光高速摄影原理创新、技术突破、辐射加固和碎片防护等方面取得的研究进展。

## 1 X光高速摄影在激光聚变中的应用需求

### 1.1 用于黑腔物理实验研究

黑腔物理是间接驱动ICF中最基础的研究方向,主要研究激光在黑腔中的传播、激光能量沉积、激光-X光转换、黑腔等离子体状态及其辐射特性等<sup>[9]</sup>。X光高速摄影相机通常被用来诊断与上述研究内容相关的多种物理现象或过程,如激光注入、注入孔缩孔、腔壁等离子体运动及光斑移动等。以传统的两端注入间接驱动ICF实验为例,研究者需要利用X光高速摄影设备从两个视角对黑腔成像(如图1所示),一是沿腔轴方向获取激光注入孔的X光图像数据;二是以倾斜视角透过激光注入孔直接观测激光光斑。获取的X光图像数据可在多个方面做出贡献,如激光注入孔图像数据可以帮助物理设计人员评估注入孔缩孔程度,进而对黑腔结构进行优化设计,而通过极点视角得到的腔内等离子体膨胀图像数据可用于校验对ICF物理设计至关重要的辐射流体程序等。另外,针对两端注入天然具有的非对称辐射缺陷,近年来ICF研究界提出了多种新型黑腔构型<sup>[10]</sup>,其结构往往包含多个激光注入孔,激光与黑腔的相互作用过程相比两端注入复杂很多,对X光高速摄影诊断技术提出了更加丰富的应用需求。

在黑腔实验中,X光高速摄影设备的观测目标为黑腔本身,其空间尺度为mm量级(3~10 mm),物理过程持续时间由激光的持续时间决定,通常为ns量级。为实现精密观测的目的,成像设备的时间和空间分辨应该至少比目标的时间和空间尺度小一个量级,通常要求时间和空间分辨须分别优于100 ps和100 μm。另外,黑腔辐射的能谱

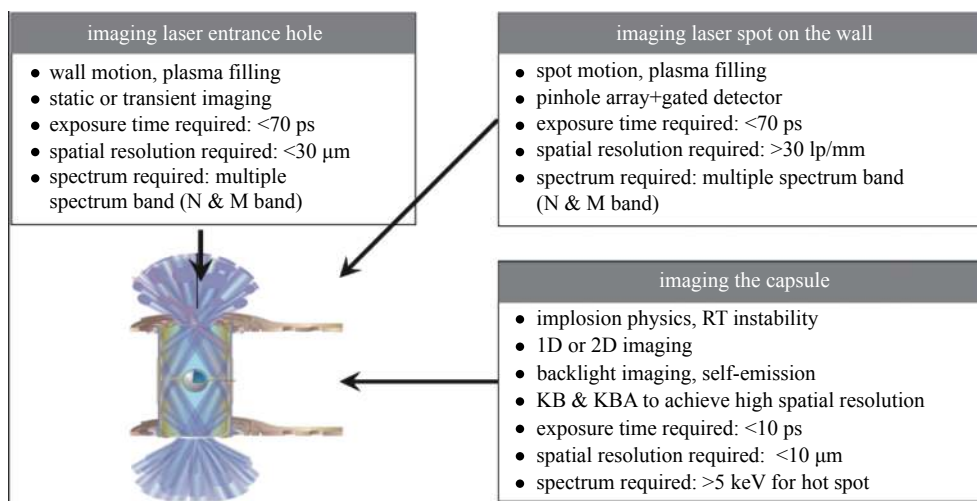


Fig. 1 Application of X-ray high-speed photography diagnostic technology in indirect drive inertial confinement fusion (ICF)

图 1 X 光高速摄影诊断技术在间接驱动惯性约束聚变实验研究中的应用

信息对于辐射流体程序的校验非常重要, X 光高速摄影设备通常需要具备谱分辨能力。

## 1.2 用于内爆物理实验研究

内爆物理实验主要关注靶丸内爆压缩的全流程及最终的内爆效能。内爆压缩过程可以分为飞行、减速和滞止等阶段, 在每一个阶段中 X 光高速摄影技术都可以为研究者提供关键信息。内爆压缩早期对称性调控是实现 ICF 内爆对称性提升的重要手段, 实验中测量早期不对称性的主要方法为通过 X 光高速摄影相机用背光照相的方式获取靶丸二维图像信息<sup>[10]</sup>。另外, 使用铍球替代靶并采用被动成像的方式也是测量早期不对称性的实验方法<sup>[11]</sup>。内爆滞止阶段的靶丸物态反映了内爆所能达到的水平, 是内爆物理研究的重要课题。X 光高速摄影相机通常被用来直接记录滞止阶段芯部自发射 X 光图像, 进而对最终的内爆对称性、Bangtime 等作出评估<sup>[12]</sup>。此外, 为评估内爆压缩过程中界面不稳定性增长带来的影响而开展的专门实验也属于内爆物理实验的范畴, X 光高速摄影设备在其中同样发挥着重要的作用。

在直接驱动中, 靶丸置于靶室中心, X 光高速摄影设备可以直接观测靶丸; 而在间接驱动中, 靶丸置于黑腔中心, 使用 X 光高速摄影设备观测靶丸通常需要在黑腔侧壁设计专门的诊断孔, 如图 1 所示。新型黑腔构型的出现使对靶丸的成像变得更加复杂, 由于没有专门的诊断孔, 成像设备必须透过激光注入孔去对靶丸成像, 此时去除黑腔等离子体造成的干扰是必须解决的难题。

在内爆实验中, X 光高速摄影设备的观测目标为靶丸。靶丸的空间尺度较黑腔小很多, 通常不超过 1 mm, 对成像设备的要求相比黑腔成像要高很多。而在内爆压缩过程中, 靶丸的形态瞬息万变, 内爆压缩形成的芯部热斑的尺寸约 100  $\mu\text{m}$ , 对应的芯部自发射过程的持续时间在 100 ps 量级。为观测这样的超快微观物理目标, 研究者通常要求 X 光高速摄影设备的空间分辨优于 10  $\mu\text{m}$ , 时间分辨优于 10 ps。

## 2 X 光高速摄影技术研究面临的挑战

美国在 2010 年率先建成国家点火装置(NIF), 并启动了 NIC 计划, 但并未如期实现点火目标。我国 ICF 实验起步较晚, 尚未开展点火规模的物理实验。因此, 我国 ICF 诊断技术的发展必须一方面满足点火规模极端物理实验所要求的工程成熟度, 另一方面还必须追求更高的技术性能, 为破解点火难题提供诊断支持。在这样的背景下, X 光高速摄影技术的发展及其工程研制面临着多方面的挑战。

### 2.1 技术性能的进一步提升面临技术瓶颈

ICF 研究人员总是希望能够同时获取高置信度的黑腔或靶丸等离子体的空间、时间及光谱信息, 这就要求 X 光高速摄影设备同时具备高空间分辨、高时间分辨及高的谱分辨能力。在空间分辨方面, 目前主要采用针孔成像<sup>[13]</sup>和显微成像<sup>[14-21]</sup>两种方式。针孔成像装置结构简单, 通道数目易于拓展, 其面临的技术矛盾为: 空间分辨能力与针孔孔径负相关, 但针孔孔径同时决定了光通量, 孔径越小通量也会越小; 目前用于 ICF 成像的针孔成像装置的空间分辨能力通常在 30~50  $\mu\text{m}$ , 能够满足黑腔成像的需求, 但无法用于芯部热斑等微小目标的诊断。ICF 显微成像主要的方式包括 KB/KBA<sup>[14-19]</sup>, Wolter<sup>[20-21]</sup>等, 显微成像同时具备高通量和高空间分辨, 空间分辨一般优于 10  $\mu\text{m}$ ,



可满足 100  $\mu\text{m}$  物理目标的成像需求,但同时也存在视场受限、视场内空间分辨一致性低及通道数目拓展困难等问题,应用成熟度还需进一步提升。

在时间分辨方面,ICF 高速摄影长期以来主要基于门控微通道板(MCP)技术<sup>[22]</sup>。通过该技术可实现的曝光时间为 50~100 ps。该技术能满足黑腔物理的诊断需求,但无法完全满足如芯部自发射等超快过程的精细诊断。缩短曝光时间面临的技术难题为:实现门控选通的电脉冲同时也为 MCP 中二次电子倍增提供加速电场,减小脉冲宽度会导致电子增益达不到要求。为解决这一技术难题,美国科学家提出了脉冲展宽技术<sup>[23-28]</sup>,其主要思想为通过色散调制及等位漂移来放大电子群的时间尺度,从而与 MCP 门控时间相匹配。国内外报道的研究进展显示,该技术可将曝光时间提升至 10 ps 以内,但同时存在许多技术缺陷,包括:1)在漂移中电子群的空间尺度也会被放大,时间分辨的提升建立在牺牲空间分辨的基础上;2)电子速度与电场的平方根成正比,常用的线性斜坡信号会造成非线性展宽,能保证高时间分辨的窗口工作时间但不能满足较长物理过程的诊断需求;3)为保证一定的空间分辨能力,光电子的漂移区常置于均匀强磁场中,产生磁场的螺线管体积庞大,限制了其工程应用。

在能谱选择方面,X 光选能成像主要基于罗斯滤片和掠入射光学系统<sup>[29-30]</sup>。罗斯滤片由 Z 值相邻的金属薄膜滤片组成,其使用简单,但能区选择灵活性差,且无法滤除高能 X 射线噪声;掠入射光学系统为非同轴光学系统,通过与单一金属薄膜滤片结合可实现带通滤波,但其光路复杂且不同成像通道往往存在难以忽视的视角差异。另外,掠入射光学元件有限的口径往往限制了成像视场。

## 2.2 辐射加固要求对设备研发带来根本性影响

在 ICF 实验中,激光与靶相互作用会产生强电磁及电离辐射,包括中子、伽玛射线、X 射线及电磁脉冲等。通常应用于 ICF 诊断的 X 光高速摄影设备主要记录 0.1~10 keV 范围内的 X 光辐射,除此之外的其他辐射产物都可能对相机的工作造成干扰或损害。当前在我国神光系列装置上开展的物理实验中中子产额一般不超过  $10^{13}$ ,这样的实验环境尚不足以导致设备工作失效,也不会造成图像信噪比的显著下降。当中子产额提高至  $10^{13}$  以上时,辐射加固会变成设备研发中必须优先考虑的因素。实验结果显示,当我们将使用科学级 CCD 相机作为图像记录介质的成像设备置于中子通量超过  $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  的环境中时图像噪声水平已经超出可以容忍的限度<sup>[31-33]</sup>。因此,在 NIF 上开展的许多需要近距离观测目标的实验中,研究者不得不放弃对时间分辨的要求,改用胶片(中子耐受度较 CCD 高 40 倍)采集时间积分图像<sup>[31-32]</sup>。如要继续在近距离获得动态图像,则必须对设备进行辐射加固改造,增加必要的辐射防护,但这会显著增大设备的重量和外形尺寸,对设备搭载环境提出了极高的要求<sup>[33]</sup>。在美国 NIF 装置上开展的中等规模( $10^{13} \sim 10^{15}$ )及大规模( $10^{16}$  以上)中子产额物理实验中,为减低环境中子通量,X 光高速摄影诊断的成像距离被显著增大,相机核心探测通常被置于靶室外<sup>[34]</sup>。实际上,辐射加固要求对 X 光高速摄影设备的设计和研制带来的影响是根本性的,特别是对用于大规模中子产额物理实验的 X 光高速摄影设备来说,辐射加固设计已经成为设备研发中最关键的技术环节。

## 2.3 高速靶碎片威胁相机工作安全

ICF 诊断用 X 光高速摄影相机研发所面临的另一个严峻挑战来自于激光与靶相互作用后靶解体而形成的高速靶碎片。靶碎片形态从块状固体到液滴到气态均有,尺寸小到数  $\mu\text{m}$ 、大到数 mm,速度可达数十  $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ <sup>[35-39]</sup>。X 光高速摄影设备造价高,靶碎片可能导致设备永久性损坏。具体来说,靶碎片一方面可能损坏设备前端光学系统,如多通道 KB 镜头等,另一方面可能损毁核心探测器件,如微通道板(MCP)。靶碎片的速度、尺寸等与靶的尺寸、激光驱动方式、能量规模等相关。可以想象,在未来我国 MJ 量级实验平台上,X 光高速摄影设备将面临更为严峻的靶碎片冲击。

# 3 X 光高速摄影技术研究进展

## 3.1 MCP 门控成像技术研究进展

基于 MCP 门控技术而开发的 X 光高速摄影设备常被称为 X 光分幅相机。X 光分幅相机<sup>[40-45]</sup>的工作过程包括光学分幅和门控选通两个环节。光学分幅可基于多针孔阵列,也可基于多通道 KB/KBA 或 Wolter 显微镜组,可将物理目标以子图阵列的形式投射到分幅变像管阴极上。变像管是分幅相机的核心,主要由近贴的微通道板和荧光屏组成,其中微通道板的输入面镀有微带阴极,其一方面作为探测入射 X 光的阴极材料,另一方面也为门控信号提供传输通道。分幅变像管的工作过程为:微带阴极将 X 光图像转化为电子图像,高速门控信号在微带阴极中传播并依次为各子图对应光电子提供倍增放大所需加速电场,经过倍增后的电子在经电场加速后高速轰击荧光屏,最终转换为可直接记录的可见光图像。

上述工作原理自 20 世纪 80 年代被提出后很长时期内都是 ICF 高速摄影诊断的唯一技术途径。在过去的数十年中,国内外研究人员围绕 X 光分幅相机主要开展了两方面研究工作,一是围绕技术指标的提升而开展的理论及实验研究工作,二是为改善相机可靠性及拓展相机应用范围而开展的工程研究工作。在技术指标提升研究方面,研究范围涉及时间分辨、空间分辨、灵敏度及谱分辨等。如在灵敏度提升方面,比较研究了金阴极和 CsI 阴极量子效率,同时开展了特种微结构高效率阴极的研究工作。为提升空间分辨,美国 NIF 装置和中国神光系列装置的研究人员均开发了多类型 KB/KBA 镜组并通过配接分幅变像管而开展高时空分辨成像诊断<sup>[14-19]</sup>,如中国工程物理研究院激光聚变研究中心联合同济大学开发了与 X 光分幅变像管配接的四通道<sup>[18]</sup>和八通道<sup>[19]</sup>显微镜系统,并在神光系列激光装置物理实验中获得应用。在能谱选择方面,掠入射平面镜及 Ross 滤片被用来实现多能点照相,如中国工程物理研究院激光聚变研究中心开展了基于 X 光平面镜的多视角多能区分幅相机的研制并用于观测黑腔内等离子体的时间演化过程<sup>[46]</sup>。在突破时间分辨瓶颈方面,研究人员同样开展了多种尝试,如中科院西安光机所研究人员提出采用双 MCP 双门控技术来缩短门控时间<sup>[47-48]</sup>。另外,研究人员曾尝试减小微通道板的厚度以降低二次电子在微通道中的渡越时间弥散,将门控时间缩短至 30 ps,但由于牺牲了图像增益,该技术并没有从根本上解决问题。

分幅相机的工程研究主要面向相机的应用环境要求,以可靠、安全、智能为目标。在 ICF 实验中,分幅相机需要搭载于专门的诊断搭载平台(DIM)中。实验中 DIM 与靶室内高真空环境相连通,可保障变像管对环境的要求,但相机其他组成部分,特别是电子学系统必须在大气环境下才能正常工作。解决该问题的方法是引入“太空舱式诊断包”的概念,即在相机中增加真空密封的气室结构。另外,相机应用环境与工作人员所处环境是分开的,相机状态的设置及监测需要通过远程控制的方式来实现。工程化 X 光分幅相机至少包括四个部分:1)分幅变像管;2)气室;3)光学分幅系统(针孔阵列或 KB 镜组);4)电子学与远程控制系统(集成于气室内部)。由于 X 光分幅相机在 ICF 实验中的重要性,美国 Omega 装置和 NIF 装置、法国 LMJ 装置等均配置了多类型工程化分幅相机<sup>[40-44]</sup>。

在国内,中科院西安光机所和深圳大学等优势单位在气室型 X 射线分幅相机工程研发方面也开展了细致的分解研究工作<sup>[47-48]</sup>。中国工程物理研究院激光聚变研究中心曹柱荣课题组长期致力于高性能 X 光分幅相机的研发,近年来面向我国神光系列装置的诊断配置需求,开发了多套分幅相机设备,整体水平达到国际先进,部分关键技术指标达到国际领先水平。图 2 为曹柱荣团队研发的分幅相机总体构成及性能指标,其中图 3(a)为该团队研发的用于在某大型激光装置靶室上极点位置开展成像诊断的紧凑型 X 光分幅相机,图 3(b)和图 3(c)分别为黑腔物理和内爆物理实验中获得 X 光图像数据。相比国内外其他研究机构开发的 X 光分幅相机,该系统主要的技术创新包括:1)针对物理实验对多能区分幅成像的迫切需求,采用了团队首创的 X 光透射带通技术<sup>[24, 49-51]</sup>,在国际上首次实现了同视角多能区分幅成像;2)针对多种黑腔构型下辐射流近乎 2 个量级的强度差异,首创超灵敏探测技术,显著提

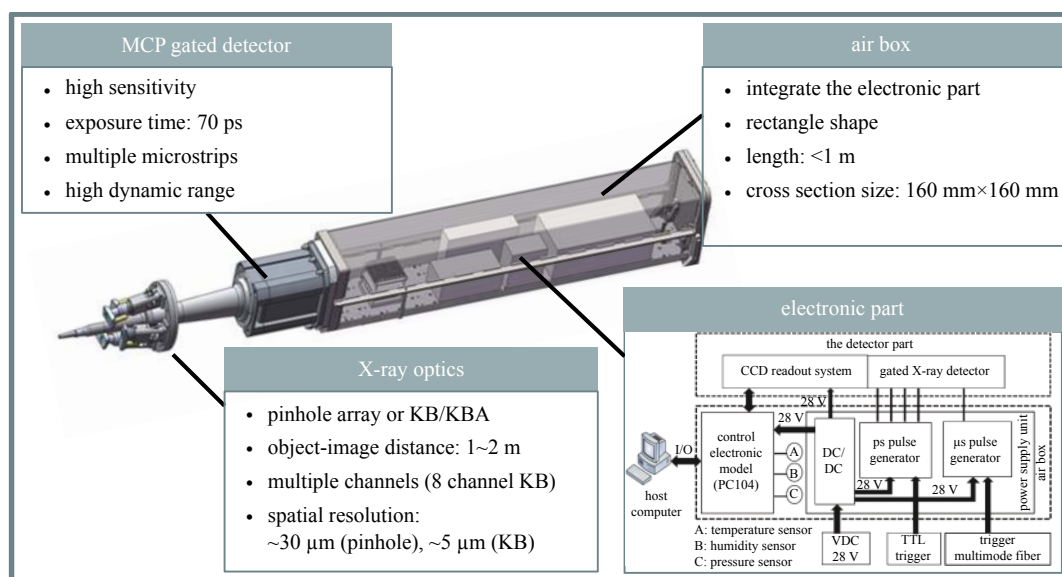


Fig. 2 Performance of X-ray framing camera system developed by Laser Fusion Research Center (LFRC), China Academy of Engineering Physics (CAEP)

图 2 中国工程物理研究院激光聚变研究中心开发的气室型 X 光分幅相机系统构成及技术性能

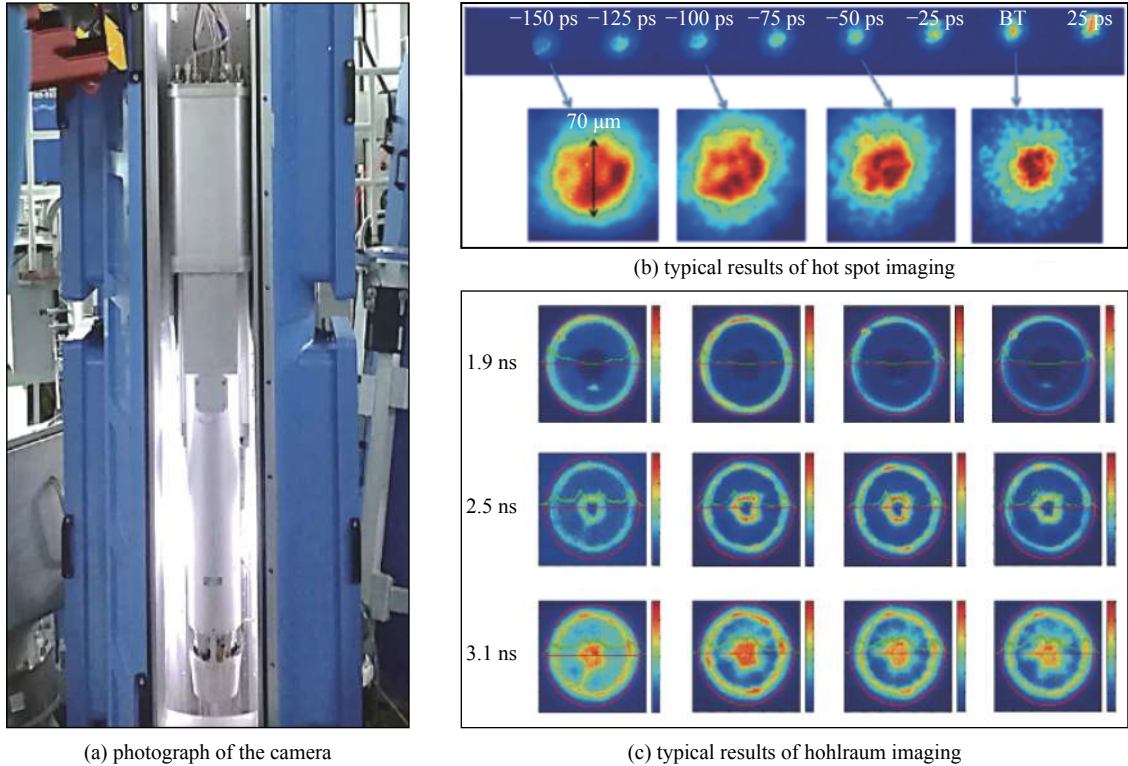


Fig. 3 X-ray framing camera developed by LFRC, CAEP

图 3 中国工程物理研究院激光聚变研究中心研发的 X 光分幅相机

升了相机灵敏度; 3) 从可靠性问题出发, 提出抽屉型气室概念, 针对某大型激光装置严苛的诊断设备搭载要求, 将这一概念进一步工程化, 设计出主体长度只有 0.4 m 的气室结构, 在相机系统小型化方面迈出重要的一步。

### 3.2 脉冲展宽成像技术研究进展

脉冲展宽成像(DIXI)是美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)科学家提出的 X 光高速摄影新方法, 其基本思想为: 通过在光电子中人为引入能量差异并使其经历漫长的漂移而使光电子群的时间尺度被展宽, 从而与门控 MCP 的响应速度相匹配<sup>[23-28]</sup>。如图 4 所示, DIXI 的工作过程为: 阴极将目标辐射的 X 光转换为电子, 阴极和栅极之间有时变电场, 电子在时变电场作用下被色散调制并穿过栅网, 在等位漂移区中漂移, 电子群的时间尺度被展宽, 再经微通道板获得倍增后轰击荧光屏发光, 将电信号重新转换为光信号。为避免电子群在漂移中因散焦而造成空间分辨率下降, 在整个漂移过程中光电子均处在由磁线圈产生的磁场中。

$$M = \frac{\Delta t_f}{\Delta t_i} \approx 1 + \frac{L}{2v_d U} \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

$$t_g = \frac{t_{MCP}}{M} \quad (2)$$

$$R_L = \frac{m_e V_{\perp}}{q_e B} \quad (3)$$

基于脉冲展宽技术的 X 光成像设备的基本性能可用公式(1)~(3)来描述, 其中公式(1)给出了时间放大因子

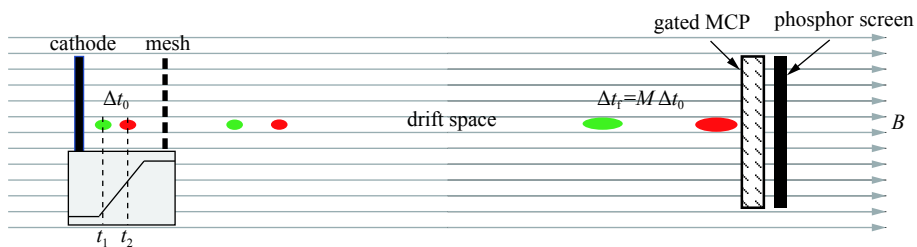


Fig. 4 Working principle of dilation X-ray imager

图 4 脉冲展宽门控成像原理



的计算,其中  $L$  为漂移区长度,  $v_d$  为电子漂移速度,  $U$  为加速电压,  $dU/dt$  为扫描电压斜率;公式(2)则给出了 MCP 门控时间和相机的最终门控时间的关系;公式(3)给出了光电子在磁场中螺旋运动的半径的计算方式,  $m_e$  和  $q_e$  分别为电子的质量和电荷量,  $B$  为磁场强度,  $V_{\perp}$  为光电子速度在磁场方向上的分量。

脉冲展宽思想的提出是 X 光高速摄影技术领域在突破时间分辨瓶颈方面迈出的重要一步。自该思想被提出后,美国 LLNL 实验室开展了大量的技术研究与工程研发工作。2012 年,LLNL 实验室报道了其研发的缩像型漂移管的测试与应用结果,首次获得优于 10 ps 的时间分辨测试结果,但由于磁场较弱且分布不均匀,其空间分辨只有 300  $\mu\text{m}$  左右,未发展为成熟的诊断系统。高性能 hCMOS 的引入大大推动了 DIXI 的应用。相比常规的 CMOS 芯片, hCMOS 可实现超快连续曝光(曝光时间  $< 1$  ns, 帧频 2 ns),结合脉冲展宽倍率超过 100 倍的 DIXI 变像管可实现优于 10 ps 的时间分辨,而 hCMOS 连续曝光功能使得只需要一个成像通道即可实现对物理目标时间演化过程的诊断,由此形成了单视线(SLOS)成像系统<sup>[52-55]</sup>这一新型诊断设计。SLOS 技术减少了成像通道数目,避免了多通道间视角差异带来的影响,同时降低了对阴极探测面和螺线管内径有效尺寸的要求。目前美国已经完成基于针孔成像和 KB 显微成像的 SLOS 系统的研发,正在研发基于 Wolter 显微成像的 SLOS 系统。

国内的优势单位如中科院西安光机所和深圳大学等也在脉冲展宽成像技术领域取得重要研究进展。其中,深圳大学研究人员提出了采用短磁聚焦透镜提高空间分辨的想法,并因此研制了口径 50 mm 的短磁聚焦漂移管,获得实验测试结果。中国工程物理研究院激光聚变研究中心近年来围绕内爆芯部自发射过程诊断对 10 ps 曝光高速摄影的需求,开展了脉冲展宽成像的自主突破工作,取得重要进展。在总体设计方面,建立了自主设计的模块化、开放式漂移管,具备长漂移距离、脉冲式强磁场加载、小型化等特征。在理论研究方面,建立了理论设计分析模型,实现本征展宽、动态渡越时间弥散、动态放大率及阴极饱和等物理问题的分析研究。同时,为准确表征系统时间分辨能力,建立了自主标定方法和平台,在三套不同的激光装置上完成多尺度标定平台自主搭建,建立了窄脉冲光束切分方法和部件,精度达到 2 ps,可实现多序列延时光脉冲输出。图 5(a)为中国工程物理研究院激光聚变研究中心曹柱荣团队研发的小口径漂移管实验测试现场;图 5(b)为输入为 40 ps 间隔的激光脉冲序列下使用超快光电管记录的展宽波形,脉冲间隔 1.6 ns,对应的放大倍率为 40 倍。根据公式(2),如果后端 MCP 的门控时间小于 100 ps,则系统的时间分辨可优于 4 ps。

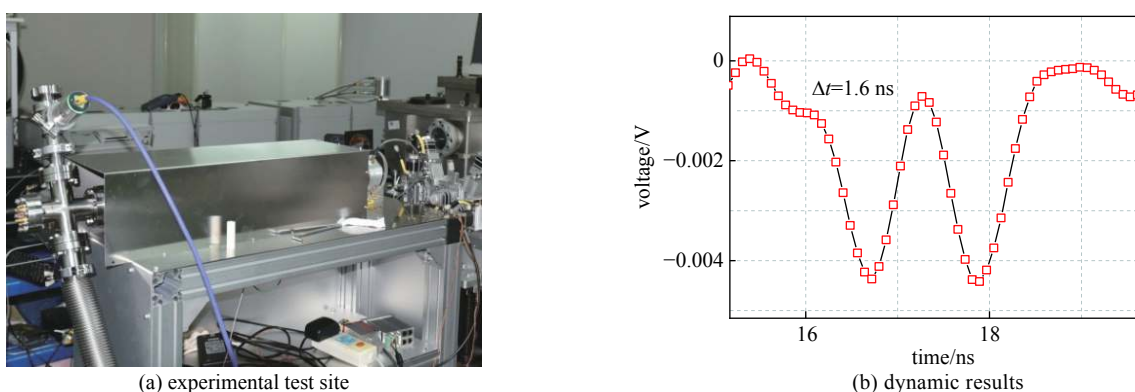


Fig. 5 Dilation X-ray imager developed by LFRC, CAEP

图 5 中国工程物理研究院激光聚变研究中心研发的卖场展宽成像系统

### 3.3 新型 10 ps 曝光高速摄影技术探索

传统的 MCP 门控成像技术采用近贴聚焦方式保证成像的空间分辨,但其时间分辨受微通道板内二次电子渡越时间弥散的限制,只有 50~100 ps。DIXI 技术摒弃了近贴聚焦方法,虽然提高了时间分辨,但光电子在漂移过程中容易发生空间弥散,导致空间分辨下降。因此, X 光高速摄影技术的发展一直伴随着时间分辨和空间分辨相互制约的技术矛盾。为解决该问题,中国工程物理研究院激光聚变研究中心曹柱荣等开展长期的技术探索与创新工作,先后提出了微扫描门控技术及同视扫描分幅成像技术等新型超快分幅成像机技术思路,为突破时间分辨瓶颈做出了有益的尝试。

微扫描技术通过对光电子空间轨迹和能谱进行精密调控与选择,进而实现极短的门控时间。其基本思想为,沿用传统 MCP 门控方法中的近贴聚焦方法以保证成像的空间分辨,在此基础上将电子门控过程和增益放大过程分解开来,门控信号不再需要同时为光电子倍增提供加速电压。微扫描皮秒门控技术的工作过程如图 6 所示,该

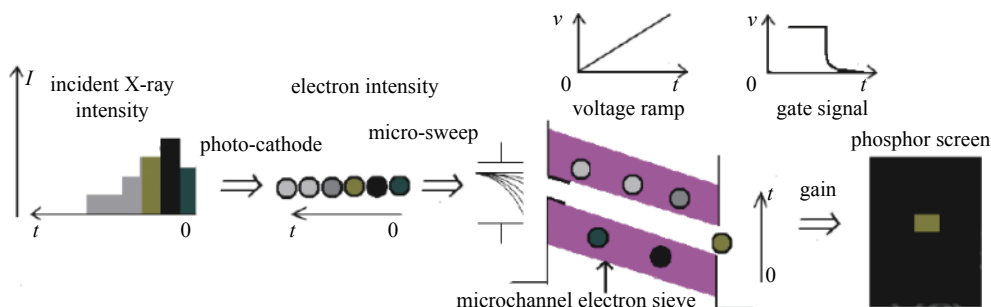


Fig. 6 Working principle of micro-sweep picosecond gate technology

图6 微扫描皮秒门控技术原理

过程描述为:入射X光经过光阴极后转换为序列光电子,输入“微通道电子筛”,在斜坡电压作用下,初始光电子在垂直于“微通道电子筛”通道方向具有了速度,且不同时间序列的电子具有不同的速度,由此导致不同时间出射的光电子有不同的运行轨迹,只有轨迹与通道几何符合的电子能够穿出通道,其他的都会被通道墙吸收,穿出通道的电子再增益放大后被记录为图像信息。经过理论模拟,该技术可将成像的曝光时间降低至10 ps以下。研究团队正在开展微扫描技术的实验验证,致力于缩短X光高速摄影设备的曝光时间,同时保证空间分辨不会降低。

同视扫描分幅技术是曹柱荣团队为突破X光成像时间分辨技术瓶颈而做出的另外一项技术创新。该技术在近似相同的成像视角内集成了多套X光一维扫描变像管和MCP门控分幅变像管,其基本思想为将分幅变像管100 ps曝光二维成像能力与扫描变像管一维10 ps曝光成像能力相结合,通过扫描成像技术可得到物理目标不同观察方位的一维高速图像数据,而通过分幅成像可以获取目标全局二维图像数据,经过算法重建有望获得全局二维高分辨图像数据。目前,曹柱荣团队已经完成该技术方案的设计工作,技术验证工作正在积极推进,相关进展将在后续进行报道。

### 3.4 抗辐射加固技术研究进展

激光打靶会产生强电磁及电离辐射,对X光高速摄影设备有用的辐射产物为0.1~10 keV范围内的X光,除此以外的其他辐射对X光高速摄影设备来说都属于环境辐射。环境辐射的影响包括两个方面:1)损坏设备关键模块,破坏设备工作状态,如强电磁辐射可能损坏电子学系统或导致电子学系统短时间内无法正常工作;2)降低图像数据信噪比,如强中子流可能与设备敏感部件(如CCD相机)相互作用而形成图像噪点,降低图像质量。本文主要介绍对中子、伽玛射线和硬X射线等电离辐射的加固技术研究进展。如前文所述,抗辐射加固需求对X光高速摄影技术的影响是根本性的,特别是,当中子产额达到 $10^{15}$ 以上时,辐射加固设计会成为成像系统设计中最重要的一环。

近期,中国工程物理研究院激光聚变研究中心曹柱荣团队联合中国工程物理研究院核物理与化学研究所中子研究团队开展了辐射加固理论与实验研究。在理论研究方面,研究团队基于当前使用范围最广、可靠性最高的中子输运蒙特卡罗模拟程序MCNP建立了大型激光装置中子辐射环境模型。该模型的建立包括三个方面的内容,即辐射源建模、装置靶室建模及靶室内诊断设备排布建模,图7(a)和7(b)分别为靶室三维外观及其内部诊断装置模型。MCNP程序支持卡片式的参数输入,具有完全开放的参数优化接口,可根据激光装置环境的变化直接对模型进行修正。此外,该程序同时提供三维可视化辅助程序,可供客户后期直观查看当前环境模型或修改模型。基于上述模型,研究团队从结构设计、材料选型和理论优化等三个方面开展了近距离工作X光高速摄影设备抗辐射加固设计。在材料选型方面,以含硼聚乙烯(PE)为中子防护材料,以铅(Pb)为伽玛射线防护材料;防护结构方面,综合考虑了伽玛射线、正向中子和侧向散射中子,同时也考虑到中子激发次级伽玛的防护;在理论优化方面,以系统最主要的敏感部件——CCD相机感受中子剂量为优化对象,优化目标为CCD感受中子通量不超过 $10^8 \text{ cm}^{-2}$ ,以诊断搭载平台对设备重量和外形尺寸的要求为约束条件,对屏蔽层结构、体积等进行了优化设计,获得了高效率屏蔽和限重屏蔽等两种方案设计,两种方案对中子和伽玛射线的评比效果如图7(c)和7(d)所示。高效屏蔽方案可实现对DT中子通量40倍的衰减,设备总重量超过1吨,可用于在靶室外开展高速摄影诊断;限重方案可实现对DT中子通量10倍的衰减,设备总重量小于200 kg,可通过诊断设备搭载平台(DIM)实现近距离观测靶丸的目标。

为验证理论设计的可靠性,研究团队在中国工程物理研究院核物理与化学研究所K400强流加速器中子源装置上开展了国内首次中子屏蔽效果专项实验,主要测试CCD相机与中子通量的对应关系。K400强流中子源装置可提供稳定的直流点源DT中子辐射,辐射通量可定量给出。在实验中,通过改变辐照时间及距离来调节中子通



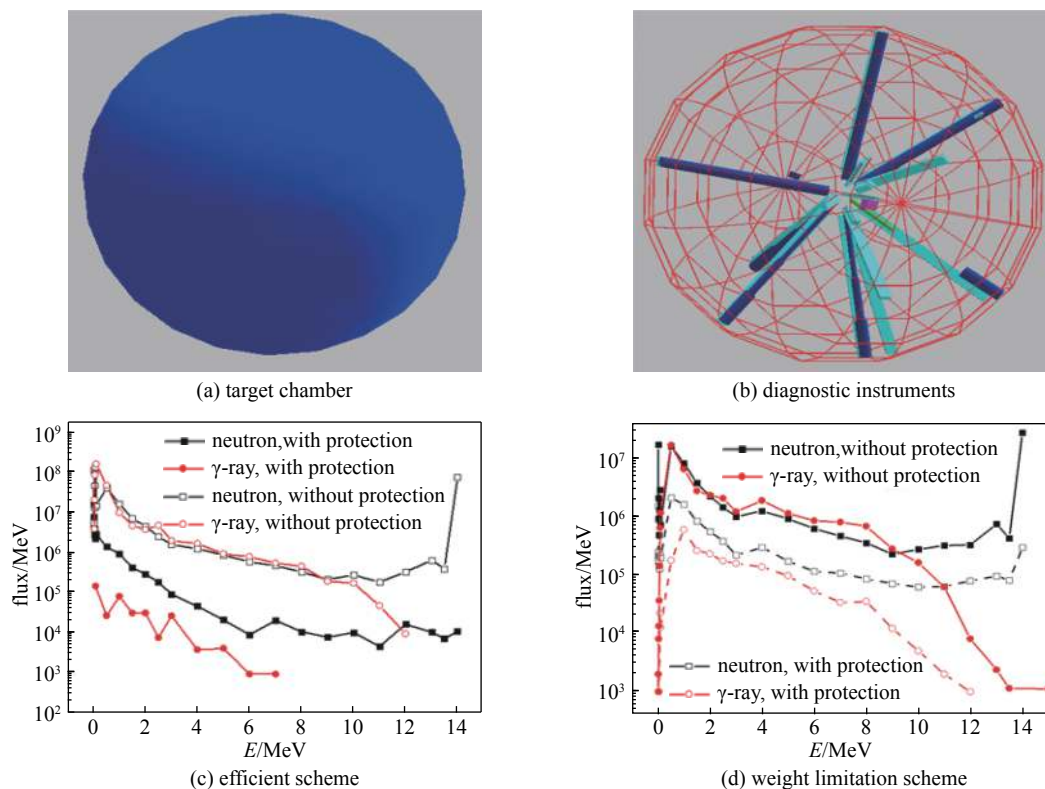


Fig. 7 Simulation model established in MCNP in 3D space  
 图 7 在 MCNP 中建立的大型激光装置辐射仿真模型

量。图 8 所示为限重屏蔽方案对 neutron 屏蔽效果的实验验证结果。可以看出，在无屏蔽时当中子通量达到  $3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$  时，图像噪点水平已经很高；采用限重屏蔽方案后，噪点水平显著下降，中子通量为  $1 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$  和  $3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$  时图像的噪点水平与中子通量为  $1 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  和  $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$  时相当，证明所设计的屏蔽方案能够实现 10 倍以上屏蔽效果。

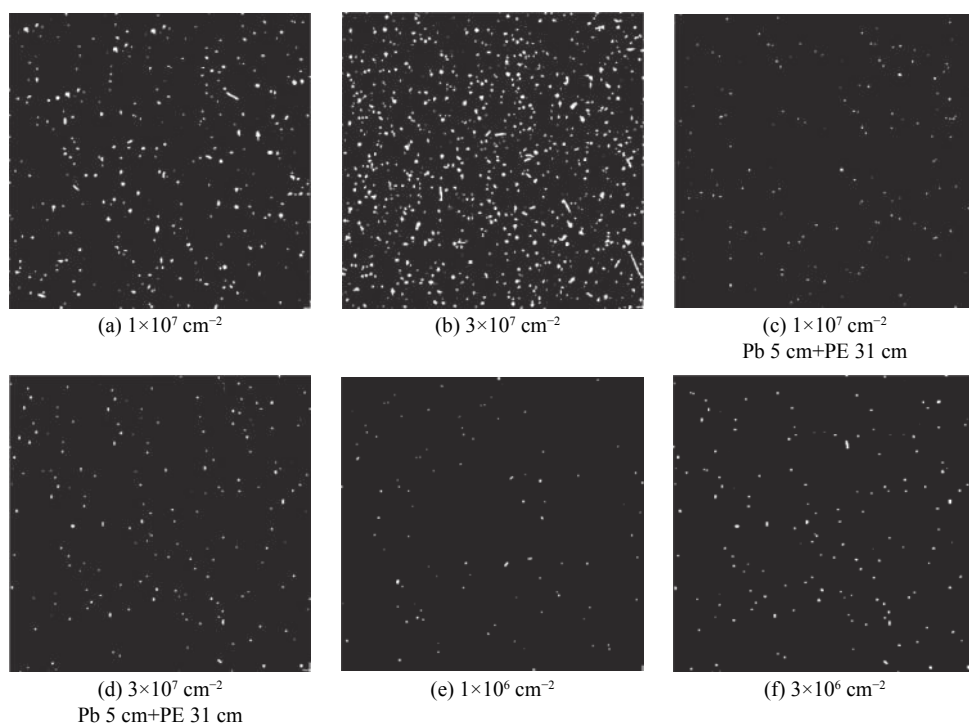


Fig. 8 Experimental verification of the integrated hardening effect of the weight-limiting scheme on CCD  
 图 8 限重加固方案对 CCD 综合防护效果实验验证

### 3.5 靶碎片理论建模与实验研究进展

在 ICF 实验中,激光打靶的瞬间,靶会被烧蚀、离化和解体,产生的靶碎片形态包括块状固体、液滴及气态等,其尺寸小到数  $\mu\text{m}$ 、大到数  $\text{mm}$ ,严重影响近距离工作诊断设备的安全性和测量准确度。美国 ICF 研究者自 20 世纪 90 年代年开始研究靶碎片,开展了靶碎片模拟、实验收集、参数表征等研究工作<sup>[35-39]</sup>。早年利用气凝胶等材料收集和碎片损伤,用 Nova 和 Omega 的损伤实验外推 NIF。2007 年,美国劳伦斯伯克利国家实验室(LBNL)联合加州大学圣地亚哥分校(UCSD)和洛杉矶分校(UCLA)共同开发了 ALE-AMR 程序,模拟 NIF 装置冷冻靶的碎裂过程<sup>[39]</sup>。该程序考虑了任意拉格朗日欧拉流体动力学、激光/离子能量沉积、辐射能传输等多种物理模型,且经过多年的碎片测量实验校验和改进,能较精确地模拟固态、液态以及气态靶破碎物的产生过程,并评估其对光学元件和诊断设备的损坏风险,同时指导靶结构设计,为兆焦耳激光装置的严苛诊断环境中的碎片防护提供设计依据。

随着驱动器能量的增加,中国 ICF 研究人员逐渐认识到靶碎片影响的严重性,并开始研究。2018 年,中国工程物理研究院激光聚变研究中心曹柱荣团队与中国工程物理研究院流体物理研究所爆轰实验微喷研究团队合作开展激光靶碎片的理论建模与实验测试研究。在理论模拟方面,以金黑腔尺寸、激光在金黑腔内表面的作用位置、激光在黑腔内表面产生的压力、激光在金黑腔内沉积的能量作为输入条件,基于 Autodyn 中 SPH 模块建立了万焦耳级激光能量下金黑腔靶破碎过程的三维模拟手段。图 9 给出了金黑腔靶在激光作用下破碎演化不同时刻的图片,模拟结果给出了金黑腔的直径从 1.2 mm 扩张到约 70 mm 的过程。其中激光打靶点运动最快,到达直径 70 mm 位置的碎片都来源于激光烧蚀对应的区域,金腔其余部分在辐射压作用下扩张至直径约 30 mm。同时,在金腔轴向由于向内运动的粒子发生强烈碰撞,故沿腔轴形成了较强的轴向射流。程序同时模拟得到金黑腔靶上不同点物质运动速度,其速度的分布范围为 5~40 km/s。分析碎片空间角向分布还发现,高速的碎片主要分布在纬度不超过  $15^\circ$  的范围内,速度最大的碎片分布在纬度约为  $0^\circ$  位置,速度值约为 40 km/s。由碎片分布及自相似膨胀规律估算,作用在距靶 15 cm 的  $\phi 5\text{ mm}$  圆形区域的碎片质量为  $\mu\text{g}$  量级。

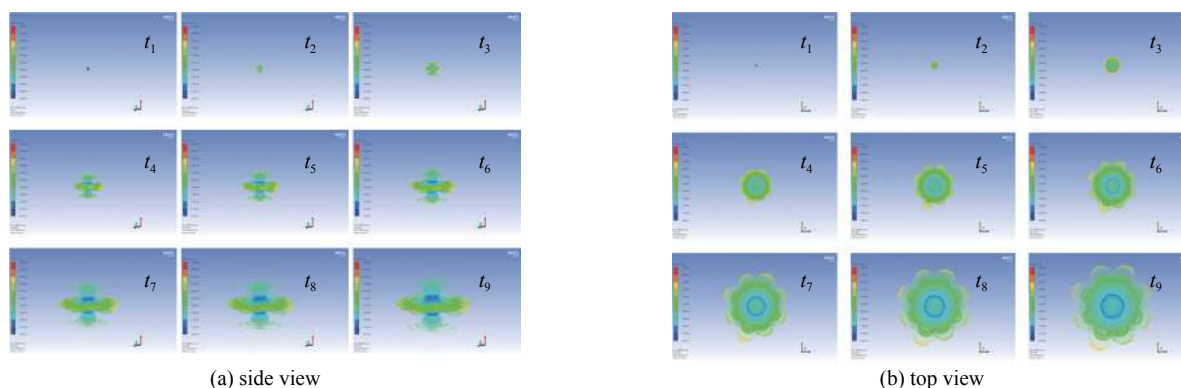


Fig. 9 Spatial distribution of target debris at different times

图 9 不同时刻靶碎片空间分布图

为了校验模拟程序,2019 年研究团队在神光 III 原型装置上首次开展了标准黑腔靶的靶碎片测量实验。针对原型激光装置专门研发的碎片测量系统(图 10)距离靶室中心 15 cm,以两块  $100^\circ$  的柱板作为测量板(直径 30 cm,高 30 cm),测量板上的不同区域分别排布 4 种碎片测量材料:金属膜、回收材料、破坏效应板、石英计。实验首次获得了与模拟结果相符的碎片特征:(1)碎片空间分布不均匀,大概率分布在激光束平面及纬度  $15^\circ$  范围内;(2)金属膜测试结果显示,碎片速度分布范围为 10~40 km/s;(3)由金属膜测试结果推算碎片质量分布为 1~4  $\mu\text{g}$ 。

评估和研究靶碎片,针对性地开展诊断设备防护,并指导诊断设备和靶的设计,对安全稳定地开展 ICF 实验具有不



Fig. 10 Target debris measurement system

图 10 靶碎片测量系统照片

容低估的重要意义。本次靶碎片模拟程序的开发和测量实验的开展是国内 ICF 领域的靶碎片研究迈出的第一步，为未来 MJ 能量装置的物理实验和诊断设备设计奠定了基础。

## 4 结 论

X 光高速摄影诊断技术在 ICF 研究中发挥着不可替代的重要作用，与其相关的技术和工程研究一直都是 ICF 诊断建设的重要组成部分。在 NIC 计划牵引下，美国已形成较为完整的高速摄影诊断配置。我国 ICF 研究起步较晚，尚未开展点火规模的物理实验，因此，我国 X 光高速摄影技术的发展必须一方面满足点火规模极端物理实验所要求的工程可靠性，另一方面不断寻求技术突破，为破解点火难题提供诊断支持。诊断技术的发展必须始终坚持工程研发与技术突破相结合，在不断提高工程可靠性的同时坚持原始创新，在基础方法、元器件等方面追求技术突破。本文综述了国内外 ICF 诊断用 X 光高速摄影技术研究现状及挑战，同时重点介绍了中国工程物理研究院激光聚变研究中心近年来在该领域取得的研究进展。这些研究进展包括：1) 面向神光系列装置，开发了基于门控 MCP 的 100 ps 曝光高性能高速摄影相机，整体达到国际先进水平，并在高灵敏探测、透射式带通滤波和结构小型化等方面形成中国特色；2) 提出微扫描门控、同视扫描分幅等 10 ps 曝光 X 光高速摄影新方法新技术，为突破时间分辨瓶颈做出有益尝试；3) 在国内率先开展抗辐射加固高速摄影相机理论设计、技术验证与工程设计；4) 针对激光聚变靶碎片对相机安全工作的威胁，在国内首次开展靶碎片的理论建模与仿真研究，并开展首次验证实验，取得重要进展。上述研究进展有力推动了我国 ICF 诊断用 X 光高速摄影技术的发展，进而推动我国 ICF 诊断能力建设迈上新台阶。

**致 谢** 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心实验物理团队的指导和帮助。

## 参考文献：

- [1] Keefe D. Inertial confinement fusion[J]. Annual Review of Nuclear and Particle Science, 2003, 32(1): 391-441.
- [2] Yamanaka C. Inertial confinement fusion[J]. Physica Scripta, 2007, 1982(T2B): 486.
- [3] Yamanaka C. Inertial confinement fusion: The quest for ignition and energy gain using indirect drive[J]. Nuclear Fusion, 2002, 39(6): 825.
- [4] 江少恩, 丁永坤, 缪文勇, 等. 我国激光惯性约束聚变实验研究进展[J]. 中国科学: G辑, 2009, 39(11): 1571. (Jiang Shaoen, Ding Yongkun, Miao Wenyong, et al. Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China[J]. Sci China Ser G, 2009, 39(11): 1571)
- [5] 贺贤土. 惯性约束聚变研究进展和展望[J]. 核科学与工程, 2000(3): 57-60. (He Xiantu. Progress and prospects for inertial confinement fusion research[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2000(3): 57-60)
- [6] Moses E I. The National Ignition Campaign: status and progress[J]. Nuclear Fusion, 2013, 53: 104020.
- [7] 丁永坤, 江少恩, 刘慎业, 等. 激光聚变研究中心聚变靶物理实验和诊断技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3077-3081. (Ding Yongkun, Jiang Shaoen, Liu Shenye, et al. Recent progress of physical experiment and target diagnostics in Research Center of Laser Fusion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(12): 3077-3081)
- [8] 温树槐, 丁永坤. 激光惯性约束聚变诊断学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012. (Wen Shuhuai, Ding Yongkun. Laser inertial confinement fusion diagnostics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012)
- [9] 李三伟, 杨冬, 李欣, 等. 我国激光间接驱动黑腔物理实验研究进展[J]. 中国科学: G辑, 2018, 48: 065202. (Li Sanwei, Yang Dong, Li Xin, et al. Recent progress of hohlraum physics experiments in indirect-driven ICF in China[J]. Sci China Ser G, 2018, 48: 065202)
- [10] Pak A, Dewald E, Milovich J, et al. Tuning the early-time radiation flux symmetry in indirect drive implosion experiments at the National Ignition Facility[C]//55th Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics. 2013.
- [11] 陈伯伦, 黄天喧, 江少恩, 等. 再发射技术测量SG II黑腔靶早期对称性[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(2): 385-388. (Chen Bolun, Huang Tianxuan, Jiang Shaoen, et al. Re-emission technique for early time hohlraum radiation symmetry measurements on SG II facility[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(2): 385-388)
- [12] Benedetti L B, Nagel S R, Izumi N, et al. Quantitative analysis of X-ray self emission in ICF implosions using orthogonal images[C]//58th Annual Meeting of APS Division of Plasma Physics. 2016.
- [13] 袁永腾, 侯立飞, 涂绍勇, 等. X光能点、放大倍率及针孔尺寸对空间分辨的影响[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 022001. (Yuan Yongteng, Hou Lifei, Tu Shaoyong, et al. Effect of X-ray wavelength, pinhole aperture and magnification on spatial resolution[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 022001)
- [14] Gotchev O V, Jaanimagi P A, Knauer J P, et al. High-throughput, high-resolution Kirkpatrick-Baez microscope for advanced streaked imaging of ICF experiments on Omega[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(3): 2178-2181.
- [15] 穆宝忠, 伊圣振, 黄圣铃, 等. ICF用Kirkpatrick-Baez型显微镜光学设计[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20: 409-412. (Mu Baozhong, Yi Shengzhen, Huang Shengling, et al. Optical design of Kirkpatrick-Baez microscope for ICF[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20: 409-412)
- [16] Xie Qing, Mu Baozhong, Li Yaran, et al. Design of KB complex type microscope for ICF X-ray diagnostics[C]//Proc of SPIE. 2016: 99630X.



- [17] Pickworth L, Bradley D, Pardini T, et al. A Kirkpatrick-Baez microscope for core implosion imaging at NIF[C]//APS Meeting. 2013.
- [18] Yi Shengzhen, Mu Baozhong, Wang Xin, et al. A four-channel multilayer KB microscope for high-resolution 8-keV X-ray imaging in laser-plasma diagnostics[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12: 013401.
- [19] Yi Shengzhen, Zhang Zhe, Huang Qiushi, et al. Eight-channel Kirkpatrick-Baez microscope for multiframe X-ray imaging diagnostics in laser plasma experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 103501.
- [20] Troussel P, Munsch P, Ferme J. Microfocusing between 1 and 5 keV with Wolter-type optics[C]//Proc of SPIE. 1999, 3773: 60-69.
- [21] 李亚冉, 谢青, 陈志强, 等. 激光等离子体诊断用Wolter型X射线显微镜的设计[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 062002. (Li Yaran, Xie Qing, Chen Zhiqiang, et al. Optical design of Wolter X-ray microscope for laser plasma diagnostics[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 062002)
- [22] McCarville T, Fulkerson S, Booth R, et al. Gated X-ray intensifier for large format simultaneous imaging[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76: 103501.
- [23] 袁铮, 杨志文, 李晋, 等. 基于光电子脉冲展宽的高时间分辨成像技术[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 052007. (Yuan Zheng, Yang Zhiwen, Li Jin, et al. Ultrafast time resolution 2D imaging technology based on photoelectron pulse quasi-linearly dilation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 052007)
- [24] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Dilation X-ray imager a new/faster gated X-ray imager for the NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 10E116.
- [25] Nagel S R, Ayers M J, Felker B, et al. Performance measurements of the DIXI (dilation X-ray imager) photocathode using a laser produced X-ray source[C]//Proc of SPIE. 2012: 85050H.
- [26] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 11E504.
- [27] Bai Yanli, Long Jinghua, Liu Jinyuan, et al. Demonstration of 11-ps exposure time of a framing camera using pulse-dilation technology and a magnetic lens[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54: 124103.
- [28] Cai Houzhi, Fu Wenyong, Bai Yanli, et al. Simulation of a dilation X-ray framing camera[J]. *Journal of Electron Imaging*, 2017, 26: 043003.
- [29] Yi S, Assoufid L, Takacs P, et al. Large-field high-energy KB microscope with a periodic multilayer[C]//Proc of SPIE. 2010: 78010C.
- [30] 刘利锋, 肖沙里, 钱家渝. 球面晶体背光成像系统模拟[J]. *应用光学*, 2016, 37(3): 332-336. (Liu Lifeng, Xiao Shali, Qian Jiayu, et al. Simulation of backlight imaging system by spherically bent crystal[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(3): 332-336)
- [31] Hagmann C, Izumi N, Bell P, et al. Modeling of neutron induced backgrounds in X-ray framing cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 10E514.
- [32] Izumi N, Hagmann C, Stone G, et al. Experimental study of neutron-induced background noise on gated X-ray framing cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 10E515.
- [33] Jaanimagi P, Boni R, Keck R. Neutron-induced background in charge-coupled device detectors[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(1): 801-804.
- [34] Khan S, Bell P, Bradley D, et al. Measuring X-ray burn history with the Streaked Polar Instrumentation for Diagnosing Energetic Radiation (SPIDER) at the National Ignition Facility (NIF)[C]//Proc of SPIE. 2012: 850505.
- [35] Rymell L, Hertz H. Debris elimination in a droplet-target laser-plasma soft X-ray source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(10): 4916.
- [36] Tobin M, Andrew J, Eder D, et al. Characterizing shrapnel and debris produced in high power laser experiments[C]//The 3rd International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications. 2003.
- [37] Miller M C, Celeste J, Stoyer M A. Debris characterization diagnostic for the NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(1): 537-539.
- [38] Eder D, Koniges A, Landen O, et al. Debris and shrapnel mitigation procedure for NIF experiments[J]. *Journal of Physics Conference*, 2008, 112: 032023.
- [39] Eder D, Koniges A, Bonneau F, et al. Simulation of shrapnel to aid in the design of NIF/LMJ target-diagnostic configurations[C]//The 3rd International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications. 2003.
- [40] Trosseille C, Aubert D, Auger L, et al. Overview of the ARGOS X-ray framing camera for Laser Megajoule[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 11D620.
- [41] Oertel J, Aragonez R, Archuleta T, et al. Gated X-ray detector for the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77: 10E308.
- [42] Kimbrough J R, Bell P M, Bradley D K, et al. Standard design for National Ignition Facility X-ray streak and framing cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 10E530.
- [43] Kimbrough J R, Bell P M, Christianson G B, et al. National Ignition Facility core X-ray streak camera[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72: 748-750.
- [44] 李晋, 胡昕, 樊龙, 等. X射线条纹相机阴极制备及其绝对标定[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 082003. (Li Jin, Hu Xin, Fan Long, et al. Fabrication and absolute calibration of X-ray streak camera cathode[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 082003)
- [45] 曹柱荣, 刘慎业, 张海鹰, 等. 神光III核心X射线分幅相机[J]. *光子学报*, 2009, 38: 1881-1885. (Cao Zhurong, Liu Shenyue, Zhang Haiying, et al. SHEN-GUANG III core X-ray framing cameras[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38: 1881-1885)
- [46] Wang Qiangqiang, Deng Bo, Cao Zhurong, et al. Development of a gated X-ray imager with multiple views and spectral selectivity for observing plasma evolution in hohlraum[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2019, 90: 073301.
- [47] 杨文正, 白永林, 秦君军, 等. 软X射线皮秒分幅相机的增益压窄效应[J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(5): 755-760. (Yang Wenzheng, Bai Yongling, Qin Junjun, et al. Gain narrowing effect of soft X-ray picoseconds framing camera[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(5): 755-760)

- [48] Yang Wenzheng, Bai Yonglin, Liu Baiyu, et al. Temporal resolution technology of a soft X-ray picosecond framing camera based on Chevron micro-channel plates gated in cascade[J]. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A](#), 2009, 608: 291-296.
- [49] Cao Zhurong, Jin Fengtao, Dong Jianjun, et al. Soft X-ray low-pass filter with a square-pore microchannel plate[J]. [Optics Letter](#), 2013, 38: 1509-1511.
- [50] 曹柱荣, 董建军, 杨正华, 等. 一种透射式软X光带通方法研究[J]. [物理学报](#), 2013, 62: 045205. (Cao Zhurong, Dong Jianjun, Yang Zhenghua, et al. A new method of soft X-ray transmission band-pass[J]. [Acta Physica Sinica](#), 2013, 62: 045205)
- [51] 袁铮, 曹柱荣, 朱效立, 等. 一种X射线成像型平响应低通滤波技术[J]. [光学学报](#), 2013, 62: 045205. (Yuan Zheng, Cao Zhurong, Zhu Xiaoli, et al. A technology of X-ray imaging flat-response low-pass filter[J]. [Acta Optica Sinica](#), 2013, 62: 045205)
- [52] Ayers M J, Nagel S R, Felker B, et al. Design and implementation of Dilation X-ray Imager for NIF "DIXI" [C]//Proc of SPIE.2013: 88500C.
- [53] Carpenter A C, Dayton M, Kimbrough J, et al. Single line of sight CMOS radiation tolerant camera system design overview[C]// Proc of SPIE. 2016: 99660H.
- [54] Engelhorn K, Hilsabeck T J, Kilkenny J, et al. Sub-nanosecond single line-of-sight (SLOS) X-ray imagers (invited)[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2018, 89: 10G117.
- [55] Nagel S R, Carpenter A C, Park J, et al. The dilation aided single-line-of-sight X-ray framing camera for the National Ignition Facility: Characterization and fielding[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2018, 89: 10G125.