

DOI:10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202604001

激光惯性约束聚变内爆诊断技术研究综述

吴宇际,叶佳杰*,张青,沈瑞强,罗意博,李煜,刘嘉俊

(火箭军工程大学,西安 710025)

摘要:激光惯性约束聚变内爆诊断是理解聚变物理、评估压缩效率与实现点火目标的关键技术,对实现高增益稳定点火具有重要意义。基于此,按照内爆时序,系统梳理了激光惯性约束聚变中冲击波诊断、X射线成像诊断、质子诊断和中子诊断4种诊断技术的基本原理与研究进展。其中,冲击波诊断由点测量向多维成像、主被动融合演进;X射线成像已形成自发光、背光与相衬成像优势互补的诊断体系;质子诊断从被动式积分测量拓展至主动式单幅成像与时间分辨摄像;中子诊断通过能谱、产额与成像技术的协同发展,实现对离子温度、燃料面密度及热斑形貌的全面表征。在此基础上,分析了各诊断技术面临的挑战,从测量核心物理量、时间分辨率、空间分辨率、测量相对误差、适用内爆阶段、核心优势、核心瓶颈、工程化成熟度等8个维度,对4种技术及核心分支方案作了全面对比,明确了不同技术的适用边界与选型依据,并展望了其向更高精度、更全维度、更高时间分辨与智能化方向的发展趋势,旨在为我国激光聚变点火工程提供系统的诊断技术参考。

关键词:激光惯性约束聚变;冲击波诊断;X射线成像;质子诊断;中子诊断

中图分类号:TN206

文献标志码:A

开放科学标识码(OSID):

文章编号:2097-2741(2026)04-0001-21



听语音
与作者互动
聊科研

能源是现代工业社会发展的核心驱动力。核电作为高效清洁能源,近年来投资热度持续上涨,过去五年增幅超50%^[1]。与裂变能源相比,聚变能源具有更高能量密度、更少放射性废物等优势,被视为面向未来的理想清洁能源^[2]。聚变能源的利用方式主要包括磁约束聚变和惯性约束聚变。其中,激光惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)利用高功率激光直接或间接辐射烧蚀压缩靶丸,使其达到高温高密度状态,进而发生热核反应,是实现可控核聚变的重要途径之一^[3]。2022年,美国国家点火装置(national ignition facility, NIF)率先在实验室实现靶增益大于1的科学点火,截至2025年底,已重复实现10次聚变点火,标志着激光惯性约束聚变技术取得里程碑式突破^[4-6]。我国也在“神光”系列装置上持续开展多项关键实验,稳步

推进点火目标实现^[7-9]。

近年来,通过优化驱动激光、腔体设计、靶丸设计等^[10-12],内爆性能不断提升,聚变能量产额逐步增加^[13-14]。然而,点火能量增益和重复性仍无法满足聚变发电需求,主要是由于驱动过程中产生的流体不稳定性增长和界面混合等,导致内爆压缩效率未达预期^[15-16]。因此,开展内爆诊断并深入分析这些物理过程,是驱动加载调节、靶优化设计、不稳定性控制的前提,对实现高增益稳定点火具有重要意义。

内爆压缩过程包括预脉冲加热、烧蚀压缩、停滞、点火膨胀等阶段,各阶段所适用的诊断技术如图1所示。预脉冲加热阶段,激光或X射线加热靶丸外表面以产生初始冲击波,该阶段主要使用冲击波诊断技术。烧蚀压缩阶段,在烧蚀压力驱动下靶

收稿日期:2026-03-19

修回日期:2026-05-22

录用日期:2026-05-29

第一作者:吴宇际(1993—),男,副教授,主要从事核工程与核技术研究。

*通信作者:叶佳杰(2002—),男,硕士研究生,主要从事核工程与核技术研究。

引用格式:吴宇际,叶佳杰,张青,等. 激光惯性约束聚变内爆诊断技术研究综述[J]. 火箭军工程大学学报,2026,40(4):1-21. WU Yuji, YE Jiajie, ZHANG Qing, et al. Review on diagnostic techniques for laser inertial confinement fusion implosion[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40(4): 1-21.

丸快速压缩,该阶段主要采用 X 射线和质子诊断技术。滞止阶段,靶丸动能转化为内能形成中心热斑并发生聚变点火,该阶段主要使用 X 射线、质子诊断和中子诊断技术。点火膨胀阶段,聚变热压力导

致燃料向外膨胀,该阶段主要使用自发光 X 射线成像和中子诊断技术。下面将系统阐述 ICF 中冲击波诊断、X 射线诊断、质子诊断和中子诊断等技术研究进展,并对未来发展趋势进行展望。

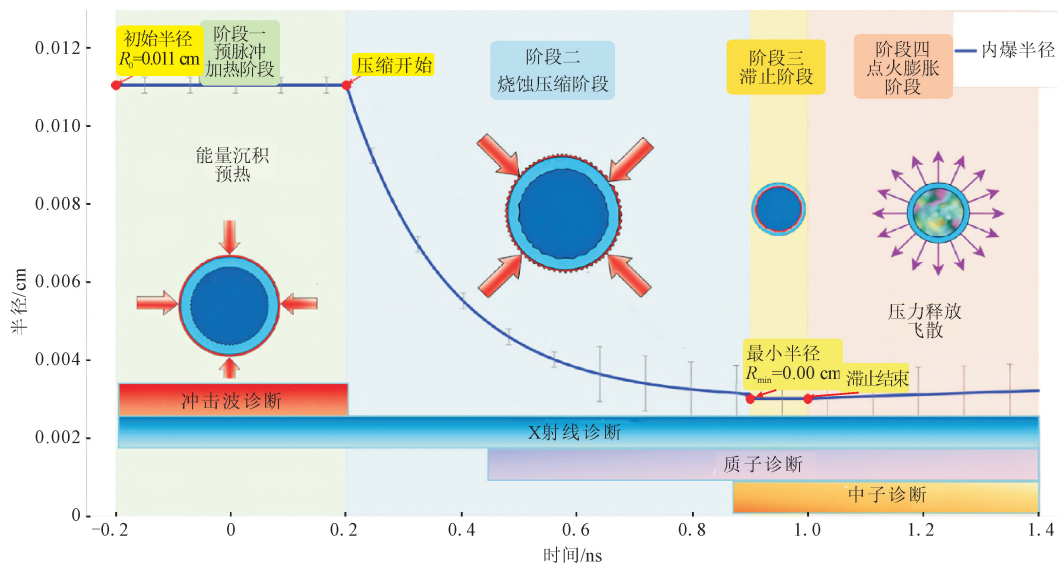


图 1 激光聚变内爆诊断技术适用阶段分析

Fig. 1 Timeline of diagnostic techniques for different stages of laser inertial confinement fusion implosion

1 冲击波诊断技术

冲击波速度、形状特征与内爆压缩均匀性密切相关,冲击波的高精度、高时空分辨测量是评估内爆性能的关键。下面将系统梳理被动式冲击波诊断、主动式冲击波诊断及相关算法研究进展,重点分析任意反射面速度干涉仪(velocity interferometer system for any reflector, VISAR)在三维诊断、强噪声信号提取等方面的挑战与发展方向。

1.1 被动式冲击波诊断技术

被动式冲击波诊断技术主要用于获取冲击加载材料产生的发光信号,具有光路简单、能够探测不透明材料内部冲击波等优势^[17]。在 ICF 实验中,通常使用光学条纹高温计(streaked optical pyrometer, SOP)对冲击波阵面发光信号进行采集。当激光驱动冲击波在靶丸壳层中传播时,壳层低 Z 材料会被压缩并加热到极高温度,从而产生热辐射,通过 SOP 可以实现冲击波阵面温度演化过程诊断^[18-19]。通过特殊的靶设计,SOP 也可用于冲击波速度诊断。Trainor 等^[20]使用阶梯式铝靶进行激光驱动冲击波被动式速度诊断,该实验设置如图 2 所示。根据高速扫描相机所记录的冲击波到达靶材后表面不同高度的发光信号时间,计算得到在台阶

处的平均冲击波速度。被动式冲击波诊断技术早期因信噪比较低而应用受限。王哲斌等^[21]分析了靶室内杂散光(如受激拉曼散射、受激布里渊散射、倍频光等)影响,提出电磁屏蔽优化、光触发同步与快速门控结合、带通滤光片滤波等综合控制方案,使杂散光衰减 5 个数量级,成功获得清晰冲击波发光图像,为被动式测速技术的可靠应用奠定了基础。

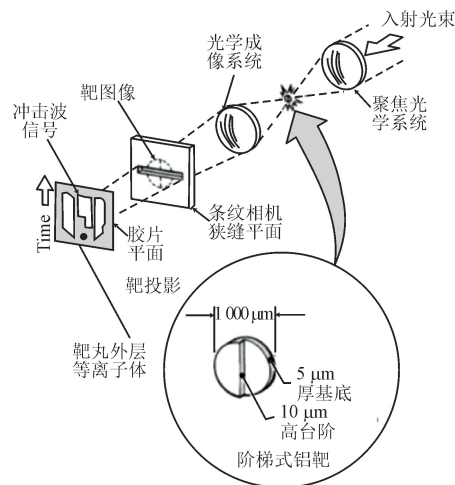


图 2 阶梯式铝靶被动式冲击波测速装置^[20]

Fig. 2 Schematic of passive shock wave velocimetry setup using stepped aluminum target^[20]

针对 SOP 系统卡塞格林折反式光学结构的收光效率低和离轴多反式光学结构的体积庞大问

题^[22-23],闫亚东等^[24-25]设计了一套高紫外透过率的被动式测速光学系统,在宽紫外波段实现高透过率和低像差成像,能够高效收集冲击发光信号,并在 300~800 nm 宽光谱范围内达到 10 μm 的空间成像分辨率。进一步在光路中增加 VISAR 光路,可形成主被动一体化的复合冲击波速度测量光学系统,如图 3 所示。系统由公共光路和光学平台两部分组成,其中,公共光路为 SOP 与 VISAR 的信号光共用通道,光学平台则主要由上层的条纹相机和下层的探针光发射单元、VISAR 差频干涉单元等组成,这标志着该技术从单一的被动诊断向集成化综合诊断平台演进。

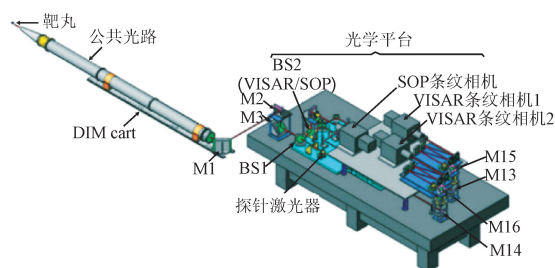


图 3 主被动一体化复合冲击波速度测量系统的总体结构^[25]

Fig. 3 Architecture of integrated composite active-passive shock wave velocity measurement system^[25]

1.2 主动式冲击波诊断技术

与被动式诊断技术相比,主动式诊断技术利用探针光探测冲击波信息,具有抗干扰能力强、速度测量精度高等优点^[21]。Barker 等^[26]首先建立了激光干涉系统,Celliers 等^[27]在其基础上针对 OMEGA 激光装置开发了线成像速度干涉仪,其系统结构如图 4 所示。探针激光在冲击波面发生反射并经过速度干涉仪进入条纹相机,干涉条纹经解算后可得一维多点速度信息。作为 ICF 冲击波诊断领域的主要工具,成像 VISAR 测速范围为 4~50 km/s,精度为 1%,还可获取界面光学反射率信息,能为高压状态方程研究、材料相变探测、冲击波调控等提供重要参考。

Moody 等^[28]在成像 VISAR 基础上进一步提出了双轴 VISAR。该系统首次在靶丸内部引入反射镜,实现赤道和极区的垂直方向冲击波速度采集。双轴 VISAR 的内置反射镜设计为 VISAR 技术发展提供了新思路,多维冲击波速度诊断已成为 VISAR 技术发展的重要趋势。Yang 等^[29]提出基于锁孔锥反射效应的 VISAR 诊断空间区域扩展的技术路线,将小靶丸尺度下有效 VISAR 数据区域提升约 3 倍。

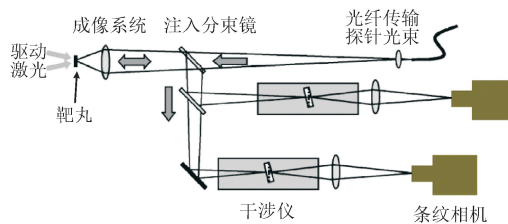


图 4 应用在 OMEGA 上的线成像冲击波诊断系统^[27]

Fig. 4 Line-imaging VISAR diagnostic system on OMEGA^[27]

在更宽范围冲击波诊断方面,吴宇际^[30]提出在靶丸内置椭球反射镜,形成广角 VISAR 诊断系统,探针光经椭球反射镜分散至靶丸内表面,携带内爆冲击波速度信息后,再经椭球反射镜返回 VISAR 成像系统。在广角诊断靶装配位置误差小于 30 μm 、倾斜角小于 4°、长轴加工误差小于 0.1 μm 、短轴误差小于 4 μm 、镜面反射率高于 70% 的情况下,广角 VISAR 可诊断靶丸南纬 40°~北纬 40°(以靶丸中心轴为南北方向)范围内任意位置冲击波速度。结合内爆对称性分析方法^[31],由条纹相位变化可获得冲击波速度变化,再对其时间积分获得位移信息,结合物像对应关系,利用勒让德多项式可描述内爆冲击波对称性演化。该技术在神光 III 原型实验中得到验证,为 ICF 内爆早期冲击波对称性诊断提供了新方法。Zhang 等^[32]发现,若烧蚀层和屏蔽层厚度不足,X 射线会部分穿透靶丸壳层并预热椭球反射镜,导致冲击波进入碳氢层后,诊断信号很快消失。可通过设计屏蔽结构以延长靶内反射镜存活时间,目前广角 VISAR 在 160 eV 辐射温度环境下已实现稳定诊断,有望进一步用于 ICF 冲击波调速实验。

1.3 高时空分辨冲击波诊断技术

内爆冲击波诊断精度不仅依赖于硬件系统,还与处理算法密切相关。为提高 VISAR 时间分辨率,Wu 等^[33]提出一种高时间分辨率冲击波速度计算方法,将速度求解过程表述为矩阵形式,并引入正则化方法和速度谱滤波方法。该算法突破了传统算法的标准具延时限制,有效抑制实验噪声和频谱泄漏误差,将 VISAR 时间分辨率从 100 ps 提升至 20 ps。两种算法得到的速度演化规律几乎相同,但是高时间分辨率数值求解算法可获取冲击载荷中速度分布不均匀过程,时间跨度大约 400 ps,表明加速过程中冲击波界面可能存在不均匀应力,也凸显出高时间分辨率冲击波速度计算方法在内爆精密化诊断中的应用潜力。傅里叶变换方法处理 VISAR 数据时,因有限窗口截断引起频谱泄漏,从而影响冲击波速度测量精度。针对这一问题,Guan

等^[34]提出结合空间四步相移法和概率密度函数补偿的数据处理算法。根据静态条纹和动态条纹具有相同的空间载波频率,使用空间相移技术将单帧速度条纹图像转换为 4 幅相移间隔为 $\pi/2$ 的图像,再用迭代补偿算法校正相移误差,并用最小二乘法计算包裹相位,展开相位得到连续相位分布,从而实现冲击波速度数据获取。传统傅里叶方法边缘频谱泄漏产生的相对误差超过 2%,部分区域甚至达到了 4%,而四幅相移法各位置速度计算相对误差低于 1%,表明该方法对噪声具有较好鲁棒性,能在不依赖窗函数的情况下有效抑制频谱泄露,提高速度场计算空间均匀性和整体精度。为弥补传统光学条纹相机二维成像能力的不足,Gao 等^[35]将条纹相机和压缩感知原理相结合,提出压缩超快摄影(compressed ultrafast photography, CUP)技术,采用空间编码、时间剪切和压缩感知算法,从单幅编码图像解算出完整事件时空演化序列,其原理如图 5 所示^[36]。

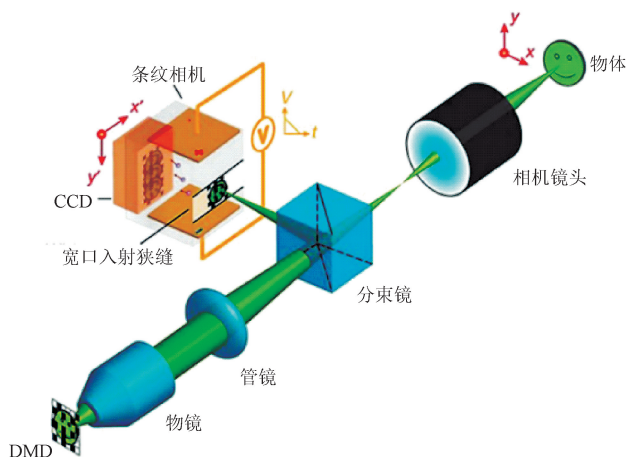


图 5 CUP 数据采集示意^[36]

Fig. 5 Schematic of CUP data acquisition^[36]

工作过程主要包括数据采集和图像重构两部分。数据采集使用数字微镜装置(digital micromirror device, DMD)对动态场景进行空间编码,编码后通过条纹相机进行时间剪切操作。此时,条纹相机狭缝完全打开,并施加线性扫描电压,将光电子根据到达时间线性偏转到空间轴。单次曝光捕捉时间演化的动态场景,时间剪切后的图像由 CCD 相机捕获,对每个像素的能量进行测量,生成包含空间和时间综合信息的二维积分图像,再利用压缩感知算法稀疏基和测量矩阵迭代搜索最优解,进行原始动态场景重构。CUP 技术已被成功应用于超快光学现象测量,但是其重建质量依赖于编码图案优化。若使用完全随机的编码,容易导致重建图像背

景噪声高、空间轮廓模糊等问题。Yang 等^[37]提出基于遗传算法的编码图案优化方案,将相关系数从 98.62% 提升至 99.34%,有效抑制了背景噪声。在 ICF 内爆诊断方面,Guan 等^[38]提出可将 CUP 与 VISAR 结合形成 CUP-VISAR 系统,以实现冲击波二维空间高时间分辨诊断。

1.4 小结

作为 ICF 内爆诊断的重要手段,冲击波诊断技术的发展体现了从点测量到线、面空间成像测量,从被动式诊断到主被动融合诊断,从硬件信息采集系统优化到高时空分辨率算法优化的过程。

被动式冲击波测速技术依靠光学系统设计以及杂散光谱滤波等技术,以较高信噪比获得冲击发光信号,通过与 VISAR 结合,可形成一套主被动一体化复合诊断系统,数据采集灵活性和鲁棒性得到提高,也标志着冲击波诊断由单一化向集成化、模块化方向发展。在主动诊断方面,线成像 VISAR 可获得冲击波一维空间高分辨速度数据,而广角 VISAR 能获取球面内爆冲击波速度数据。在诊断算法上,冲击波速度提取不再局限于传统傅里叶变换方法,而是发展到结合高速时间域数值方法、空间相位补偿以及深度学习重构等多种方法的综合处理阶段,以获得内爆冲击波面更多信息。

虽然冲击波诊断技术已有较大进步,但是仍存在一些问题限制了其在 ICF 内爆研究中的进一步应用。比如,诊断维度方面,广角 VISAR 技术虽能实现内爆冲击波面动态诊断,但是数据采集仅能获取一维信息;另外,高增益实验中将会出现非常高的辐射温度以及非常强的辐射通量,而目前用于保护诊断设备免受辐射损伤的方法在极端条件下可能无法有效工作。

为满足未来内爆实验的需求,冲击波诊断技术可能会呈现如下几种发展趋势:一是提高诊断维度,如将 CUP 技术与广角 VISAR 结合,以实现内爆冲击波整体重建;二是开发耐高温、抗辐射结构材料以提升诊断系统生存能力;三是将机器学习技术和数据处理方法相结合,形成更加高效的信号分析方法。

2 X 射线成像诊断技术

激光聚变中,利用 X 射线对高温高密度等离子体成像,能获得热斑的形成与演化、压缩对称性、燃料-烧蚀层界面混合状态等关键物理信息,对内爆性

能评估具有重要意义^[39-40]。

2.1 自发光 X 射线成像

在内爆过程中,燃料区温度、密度及核反应率的变化会影响其 X 射线自发射强度和空间分布,内爆烧蚀不均匀则会降低靶丸压缩率和聚变产额^[10,39]。自发光 X 射线成像技术能无扰动、直观地揭示由高温、高密度等离子体本身产生的 X 射线辐射特征,并将其转化为空间强度分布图像^[41]。

Davis 等^[42]在 NIF 的直接驱动实验中,将自发射图像与三维辐射流体仿真图像进行比较,对内爆过程中存在的三维扰动大小和模态进行反演评估。自发光 X 射线成像不仅是二维图像记录工具,与数值模拟相结合后,还可以成为约束和验证三维物理模型、深入理解界面混合、湍流等复杂效应的有力方法。

在成像质量与信息维度提升方面,Harding 等^[43]利用球面弯晶对磁化衬套惯性聚变靶产生的热稠密等离子体进行单色自发射成像,获得了亚毫米级径向发射结构和具有分叉特征的高分辨率图像,并发展了差分成像技术以识别不同光谱线发射源,将 X 射线成像技术从二维强度诊断推向三维结构诊断。在反射镜表面镀上多层膜结构,KB(Kirkpatrick-Baez)显微镜也可实现一定光谱分辨,且凭借较小观察角度差异可以实现多通道诊断^[44-45]。Yi 等^[46]构建了一种结合多层镜的近共轴型 KB 显微成像系统,采用双通道多层膜镜,能在单发实验中同时获取靶丸背光透视图像与自发射图像,且空间分辨率优于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 。

2.2 X 射线背光成像

X 射线背光成像利用 X 射线源主动透射诊断区域,并在一侧记录投射阴影图像,其核心挑战在于产生亮度足够高、脉宽足够短、具有较好能谱特性与空间均匀性的 X 射线源,以穿透高面密度等离子体^[47-49]。通常利用脉冲激光照射金属靶产生的轫致辐射作为 X 射线源,再通过 KB 显微镜等获得背光图像或光谱^[50]。

ICF 实验中,面密度诊断需要准单色光源,而对物质不透明度和能谱吸收特性测量则需要连续谱或宽带光源。因此,能谱调控和宽带覆盖成为背光成像技术发展的重要方向。Hu 等^[51]通过激光照射高 Z 元素混合等离子体靶,发现 1:1:1 原子比的钨、金和铋混合靶材能产生平滑且宽带的 X 射线源,光谱半高全宽约为 1 keV,转换效率也因跃迁通道的增加而提高。Opachich 等^[52]利用内爆靶丸本

身作为宽波段 X 射线连续谱背光源,实现了对不透明度样品的背光透射测量,为内爆压缩过程 X 射线背光探测提供了一种新的实验手段。

成像系统优化是提高背光成像空间分辨率和信噪比的另一个途径。在 X 射线球面弯晶成像系统中,背光源和探测器通常位于罗兰圆上,这样可以使 X 射线经过球面弯晶的衍射和反射后,重新汇聚在罗兰圆上对称点处成像。钟肖彤等^[53]将光源放置在罗兰圆内,获得了更大收光立体角,通过晶体布拉格衍射实现对特定能段 X 射线单色选择,这使得图像对比度和清晰度有了较大提高,可以结合单色吸收原理用于对面密度、温度等物理量的定量诊断。

2.3 X 射线相衬成像

X 射线相衬成像(X-ray phase contrast imaging, XPCI)是建立在 X 射线折射效应基础上的成像技术,其主要原理是当 X 射线穿过样品时会发生相位改变。该技术可以探测 ICF 靶丸中 CH、冰层、轻质泡沫等 X 射线背光成像难以观测到的弱吸收材料精细信息^[54-57]。激光聚变中,靶丸多层壳层的厚度、燃料冰层均匀性、界面缺陷以及流体不稳定性等关键信息,往往因背光成像对比度不足而难以被清晰分辨。XPCI 技术能够对这些弱吸收结构实现高衬度、高空间分辨成像,从而为理解内爆对称性、界面混合及靶丸质量评估提供可视化数据^[58]。XPCI 的实现方式有多种,如类同轴相衬成像、光栅剪切干涉法、晶体干涉仪法等。Montgomery^[54]提出 XPCI 可用于静态 ICF 靶丸高精度表征,并且有望应用于实验动态诊断中,其发展与超快、高亮度的 X 射线自由电子激光等射线源和高时空分辨率探测器技术进步密切相关。

晏骥等^[59]在北京同步辐射装置上,利用类同轴相衬成像结合微米计算机断层扫描,成功获得聚苯乙烯/聚乙烯醇/碳氢结构 ICF 多层球壳靶丸的高衬度三维图像,显著提高了对轻质材料界面的诊断精度,空间分辨率达微米量级。Wang 等^[60]开发了一套基于微焦点 X 射线源的原位相位衬度成像系统,并将其用于 ICF 靶综合表征。该系统使高空间相干性 X 射线穿过样品,再用闪烁体将 X 射线转换为可见光并在 CCD 相机上成像,成功实现对塑料靶丸壁厚、内表面粗糙度以及玻璃球壳内氘冰层凝结形貌的精确测量。

与静态结构观测相比,XPCI 技术进行动态诊断时,需有皮秒甚至飞秒级超短脉冲、足够亮度的 X

射线源,且能与驱动激光精确同步。Hodge等^[61]提出利用X射线自由电子激光作为光源对激光冲击加载下的聚变材料进行单发次、同轴X射线相衬成像,获得的二维相位衬度图像观察到了冲击波与预设空洞导致的复杂密度扰动和波阵面畸变。动态XPCI诊断还面临背景噪声干扰强、图像解读复杂以及定量相位恢复困难等问题。结合人工智能算法的计算成像方法有望解决该问题。Shi等^[62]针对ICF靶丸诊断,提出一种深度学习相位恢复神经网络,将XPCI的传播、衍射等物理成像过程嵌入到网络架构中,从单幅或少数几幅实验记录的强度图像中重建出高精度的相位分布和吸收分布图像,计算时间相较于传统迭代相位恢复算法缩短了数个数量级。该算法为在实验现场快速诊断靶丸内部界面、电子密度分布乃至识别燃料冰层中的微缺陷提供了强有力的工具。Barbato等^[58]也指出,基于现有大型激光装置参数,设计专用的XPCI诊断路径来实现靶丸内爆压缩动态诊断具有可行性。

2.4 小结

X射线成像技术作为激光聚变内爆过程的重要诊断手段,逐步向更多维度信息以及更强定量分析能力方向发展。

从吸收成像原理来看,X射线成像技术呈现自发光与背光相辅相成的发展趋势。自发光成像是内爆热斑诊断与对称性评估的直接手段,目前已从简单的针孔成像,发展到融合球面弯晶单色聚焦、多层膜KB镜多能段同步成像的高精度成像阶段,诊断信息越来越丰富、空间分辨率越来越高。伴随微纳器件、图像重建方法以及门控探测器的发展,时空分辨率和信噪比有望得到进一步提升。皮秒激光驱动的高亮度K_α源、高Z元素混合靶调控产生的宽带源等为背光成像在等离子体状态诊断、不透明度测量等方面应用提供了多样化选择。X射线相衬成像作为一种补充性成像技术,对弱吸收样品和密度梯度具有高灵敏度感知,在揭示材料微结构演化方面具有独特优势。

随着人工智能算法的发展,X射线背光成像在提高分辨率、对比度和定量精度的同时,有望实现对内爆过程更早期、更深层三维结构的动态捕捉,但算法高度依赖训练数据与真实物理场景的匹配度。ICF实验单发次成本极高,难以构建涵盖各种扰动的高保真训练集,直接将仿真训练的模型应用于实验数据时,容易导致重建伪影。因此,发展无监督或自监督的物理驱动学习模型,以及通过迁移

学习适配不同实验装置,是当前提升算法鲁棒性的关键。

值得注意的是,对于X射线成像,空间分辨受限于光源尺寸、成像系统几何模糊与衍射效应的综合影响。比如,减小针孔半径可以提高几何分辨率,但会加剧菲涅耳衍射模糊;而使用晶体或多层膜镜则受限于掠入射角下的像差和反射率;时间分辨率则受限于X射线脉冲宽度或探测器的门控时间。当针孔与探测器距离为100 mm时,对应的极限分辨率约为2 μm,当前的KB显微镜可达到3~5 μm分辨率,已接近针孔成像的理论衍射极限^[63]。X射线背光引入总能量占比低于驱动激光作用能量的2%,因此,可忽略其扰动。然而,在背光X射线的产生过程中,背光激光与固体靶相互作用产生大量超热电子和次生硬X射线,会对处于极度敏感、临界压缩状态的内爆等离子体引入预热微扰。近年来,Solodov等^[64]在NIF极向直接驱动实验中定量测量了超热电子的预热水平,当激光强度从 $7.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 增加至 $1.25 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$ 时,耦合到未烧蚀壳层的超热电子能量从激光能量的0.2%增加至0.6%,其中一半能量耦合到未烧蚀壳层内80%的区域。Döppner等^[65]通过测量50~125 keV硬X射线韧致辐射,推断出1.3 MJ激光驱动条件下,能量大于170 keV的超热电子能量上限约为150 J,模拟预测该预热水平导致内爆性能下降不超过10%。

3 质子诊断技术

质子诊断技术可分为主动诊断与被动诊断,主动诊断是利用高能质子束穿透高温高密度等离子体,通过对质子能量变化、角度偏折等信息的探测,实现内爆信息提取;被动诊断则是对热斑区域聚变反应产生的质子信息进行采集和分析,进而获取内爆核心区域面密度、温度、对称性及流体力学不稳定性等关键物理信息。质子诊断与X射线诊断和中子诊断不同,质子作为带电粒子,在穿过等离子体时会受到明显的洛伦兹力作用而发生偏转,从而在探测器上形成特定图案。下面将从被动式时间积分测量到主动式单幅成像、再到高时间分辨多幅摄像的顺序,对质子诊断技术的发展进行综述。

3.1 被动式质子测量

在ICF过程中,氘氘聚变反应可产生高能初级质子,氘氘反应产生的中子也可通过核反应间接产

生次级质子。质子在从热斑向外输运的过程中,会与燃料、烧蚀层等物质发生库仑碰撞、核反应等相互作用。质子能谱、产额及其空间角分布的精确测量结合粒子输运理论,可以实现对靶丸压缩对称性诊断^[66-67]。

高精度被动式质子诊断依赖于高性能质子谱仪与成像探测器,通常使用 CR-39 等固体径迹探测器结合吸收滤波片测量质子能谱。CR-39 探测器可以记录质子在其内部产生的损伤径迹,经化学蚀刻后,即可使用显微镜读取径迹密度与形态,进行质子通量与能量信息的反演。为提升诊断精度、能量覆盖范围和实用性,Seguin 等^[68]为 OMEGA 和 NIF 装置研制了紧凑型楔形范围滤波质子光谱仪,采用一组厚度呈梯度变化的楔形铝制滤波片阵列覆盖在 CR-39 探测器表面,只有滤波片厚度小于质子射程时,才能穿透并到达 CR-39 形成径迹。该仪器的能量检测范围可覆盖 3~20 MeV,其布局紧凑,能够在多诊断端口部署,并且可通过针对性优化滤波片材料与厚度,实现动态范围调节。Pearcy 等^[69]开发了基于 CR-39 的紧凑型磁谱仪 MagSpec,其采用永磁体产生约 0.3~0.5 T 的均匀磁场区域,不同动量的质子沿不同半径的圆弧运动,最终入射到布置在焦平面上的 CR-39 探测器。该磁谱仪可在单次内获得 1~20 MeV 范围内的质子能谱,且能量分辨率优于 5%。

3.2 主动式质子照相

主动式质子照相是记录质子束探针穿过目标后的空间注量分布、能量损失及角度散射等信息,并反演内爆过程中电磁场结构、靶丸内部材料密度分布及流体力学不稳定性演化等关键物理信息的诊断技术。与被动式质子测量依赖聚变反应源不同,主动式质子照相需要质子背光源,并结合成像系统与物理反演算法,实现对内爆过程的主动诊断^[70]。

主动式质子照相进行等离子体密度结构诊断时,其核心成像机制为探针质子与背景电子、离子的库仑散射和质子在等离子体自生磁场内的偏转。然而,在不同的等离子体参数范围内,库仑散射和自生磁场在质子照相中的贡献有所区别。Kugland 等^[71]系统分析了质子照相的适用范围,指出当等离子体数密度较低($10^{17} \sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)、面数密度较低($10^{16} \sim 10^{20} \text{ cm}^{-2}$)、探针质子能量适中(5~60 MeV)时,库仑散射可忽略不计,图像衬度主要由电磁场偏转决定。然而,在 ICF 内爆高密度等离子

体环境下,上述条件往往难以满足。Deng 等^[72]提出当等离子体密度升高时,库仑散射会降低探测器上记录的电磁场信号对比度。内爆压缩后期,热斑数密度可达 $10^{25} \sim 10^{26} \text{ cm}^{-3}$,燃料区面密度高达 $10^{23} \sim 10^{25} \text{ cm}^{-2}$,在此条件下,库仑散射成为质子与等离子体相互作用的主导机制,质子在穿过燃料区时将发生显著的多次小角度散射,导致图像模糊和空间分辨率下降。因此,在典型 ICF 内爆实验条件下,单纯基于电磁场偏转的质子照相模型不再适用,必须将库仑散射和能量损失效应纳入图像解读的考虑范围。此外,ICF 内爆过程中自生电磁场的贡献同样不可忽略。Walsh 等^[73]的三维扩展磁流体学模拟研究表明,Biermann 电池效应可在内爆停滞阶段产生超过 10^4 T 量级的自生磁场,对于 10 MeV 质子,其在磁场中的轨迹将受洛伦兹力影响而产生强偏转。

主动式质子照相成像对比度取决于注量对比度、能量对比度和角度对比度。其中,注量对比度是质子照相最直观、应用最广泛的信息载体。Kugland 等^[71]系统地建立了低等离子体数密度下电磁场结构与质子束图像之间的定量映射关系,指出质子图像中的亮区对应磁场梯度较小或电场汇聚区域,而暗区则对应磁场梯度较大或电场发散区域。

主动式质子照相通过点投影成像,将小尺寸质子源近似为点光源,靶丸置于光源与探测器之间,当质子束穿透靶丸后将携带电磁场与密度信息,在探测器平面上形成投影图像。该构型光路简单,放大倍率可调,无需复杂成像光学元件,但其图像空间分辨率受限于质子源尺寸。典型靶背法向鞘层加速(target normal sheath acceleration, TNSA)质子源为 50~200 μm ,对应几何模糊限制下的极限分辨率约为 10~50 μm 。点投影质子照相的早期发展依赖于 TNSA 质子源的成熟。Borghesi 等^[74]在卢瑟福阿普尔顿实验室率先开展了 TNSA 质子束应用于激光-等离子体相互作用电场诊断实验。该实验采用点投影成像方案,使 TNSA 质子束穿过激光辐照薄膜靶产生的长尺度等离子体,在 CR-39 探测器上记录得到清晰的电场结构图像,验证了质子照相技术探测瞬态电磁场的能力。Li 等^[66]在 OMEGA 激光装置上采用 TNSA 质子束作为探针,穿透处于内爆压缩阶段的靶丸,发现内爆过程中靶丸内部压缩径向与电场方向始终保持一致,由初始向内逐渐减弱并最终反向。这一工作首次揭示了 ICF

内爆过程中的自生电场结构及其动力学演化。为研究黑腔内等离子体的电磁场分布对间接驱动 ICF 靶丸压缩性能的影响。Pearcy 等^[67]在 OMEGA 装置上开展了模拟 NIF 黑腔条件的腔室等离子体质子照相实验,采用 14.7 MeV 单能质子探针,首次获得了激光驱动黑腔腔室内大尺度电磁场的二维分布图像。

为提升质子照相的定量诊断能力,Mackinnon 等^[75]发展了基于网格偏转测距的质子照相诊断技术。在质子源与靶丸之间插入一个已知周期的高对比度网格,经网格调制后,质子束在探测器上形成规则的网格阴影图案。当质子束因电磁场偏转产生局部角度扰动时,网格阴影发生位移。通过精确测量网格位移量,并结合成像几何参数,可反演出质子束的偏转角度分布,进而约束电磁场强度与空间分布。该技术角度灵敏度优于 $10\ \mu\text{rad}$,空间分辨率可达数十微米。Tubman 等^[76]对网格偏转测距的质子照相诊断技术进行了优化,采用 D^3He 背光靶产生 14.7 MeV 质子探针,结合网格偏转测距技术,对 OMEGA 装置上的磁化靶内爆过程进行了单发次质子照相。实验在质子源与靶之间插入 $10\ \mu\text{m}$ 金周期网格,通过测量网格阴影的局部位移量,定量重建了磁化等离子体柱区域的偏转角分布。

主动式质子照相记录的注量图像是电场与磁场共同作用的结果,如何从单一图像中分离两者的贡献是长期存在的难题。Pearcy 等^[67]开发的基于双能质子探针的电场-磁场贡献分离方法,在 OMEGA 激光装置上采用 Sutcliffe 等^[77]发展的三粒子背光源平台,同时产生 3.0 MeV 和 14.7 MeV 两种能量的质子探针,利用电场与磁场对质子偏转的能量依赖差异,通过在同一发次实验中获取两种不同能量质子的注量图像,联立求解偏转角方程组,实现电场与磁场的空间分布解耦,首次实现对激光驱动腔室等离子体中电场与磁场的空间分离测量。结果表明,在腔室中心区域,磁场贡献约占 70%,电场贡献主要集中在腔室边缘及激光入射点附近。

值得注意的是,在主动式质子照相中,高能质子束穿透内爆等离子体,并通过库仑相互作用向等离子体沉积能量,其对临界压缩状态的燃料区引入了不可忽略的微扰。质子在等离子体中的能量损失可由 Bethe-Bloch 公式描述为

$$-dE/dx = (4\pi e^4 n_e)/(m_e v^2) \ln \Lambda \quad (1)$$

式中: $\ln \Lambda$ 为库仑相互作用积分的截断比对数;质子在等离子体中的能量沉积率与等离子体密度成正

比。对于 10 MeV 质子穿透面密度约 $1\ \text{g}/\text{cm}^2$ 的压缩燃料区,能量沉积约为 $0.2\sim 0.5\ \text{MeV}$,占质子初始能量 2%~5%。尽管单发次总沉积能量有限,但局部能量沉积密度可达 $10^{11}\sim 10^{13}\ \text{W}/\text{g}$,可在皮秒时间尺度上引起局部温度显著升高。因此,主动式质子照相需要在穿透能力与能量沉积之间进行权衡。

3.3 时间分辨质子诊断

被动式质子诊断依赖于聚变反应自发射质子的时间积分测量,主动式质子照相虽能实现瞬态成像,但单发次单幅图像难以解析内爆过程中电磁场、粒子加速及流体不稳定性皮秒至纳秒尺度演化^[70]。时间门控质子辐射技术是实现时间分辨的可行途径,利用超快门控探测器,在不同时间窗口记录质子探针穿过目标后的注量分布,从而重构电磁场及密度扰动的时空演化序列。该技术关键在于质子源脉宽足够短、门控探测器响应足够快、多幅图像空间配准足够精确。Li 等^[78]在 OMEGA 激光装置上率先发展基于时间门控的单能质子辐射技术,并将其应用于激光箔相互作用和 ICF 靶丸内爆过程中的电场与磁场测量,将多个成像板探测器置于不同距离的质子飞行路径上,利用质子飞行时间差实现时间门控,结合单能质子源即可获得内爆过程不同时刻的电磁场分布诊断结果。随着 ICF 研究向更高能量增益迈进,时间门控质子辐射技术也从 OMEGA 等中等规模装置扩展至 NIF 等大型激光设施。Simpson 等^[79]在 NIF-ARC 激光系统上实现基于 TNSA 质子源的时间门控质子照相,实验采用复合抛物面聚光器增强激光-靶耦合效率,获得能量高于 20 MeV、总产额大于 10^{11} 的高亮度质子束,并通过在不同距离布置多套成像板探测器,实现了对冲击波加载实验中靶体密度演化的多幅时间分辨成像,时间窗口覆盖 $50\sim 500\ \text{ps}$ 范围。

时间门控质子成像技术的时间分辨率提高面临多重挑战,主要受限于质子源脉宽和门控窗口宽度^[80]。因此,发展超短脉宽、高亮度、能量可调的激光加速质子源是提升时间分辨能力的重要途径^[81]。Liao 等^[82]提出一种基于皮秒激光脉冲预剥蚀薄膜靶的质子加速增强方案,在飞秒主脉冲到达前数百皮秒,使用皮秒预脉冲对薄膜靶进行预剥蚀,在靶前形成大尺度、低密度预等离子体。预等离子体显著增强了主脉冲激光的能量吸收效率,使得超热电子产额增加约一个数量级,进而大幅提高了质子截止能量和总电荷。实验表明该技术可将质子束截

止能量从约 10 MeV 提升至 25 MeV,质子源脉宽压缩至 500 fs 以下。

3.4 小结

被动式质子诊断技术已实现宽范围的质子能谱测量,以及针对低能质子诊断的高精度测量。主动式质子照相技术已从卢瑟福实验室的原理验证实验拓展至 OMEGA、NIF 等大型激光装置的核心诊断平台。点投影成像、网格偏转测距技术到双能质子探针技术的突破为 ICF 内爆诊断提供了关键技术手段。在高时间分辨质子诊断方面,基于飞行时间差的多探测器阵列方案已在 OMEGA 及 NIF-ARC 装置上成功实现时间采样;质子源脉宽压缩技术不断取得突破,为亚皮秒时间分辨质子照相提供了新的手段。

面向更高增益、更高精度的 ICF 实验需求,质子诊断技术仍面临诸多困难与挑战。在质子源品质方面,TNSA 质子源虽已广泛应用于各类激光装置,但其能谱宽度过大、单色性不佳、发次稳定性差等问题仍是制约定量诊断的核心瓶颈。爆推靶单能质子源及三粒子背光源虽显著提升了单能性,但产额仍难以满足高面密度穿透需求。预剥蚀增强技术虽将脉宽压缩至亚皮秒,但其稳定性和可重复性仍需进一步提升。在时间分辨能力上,现有高时间分辨质子诊断技术多依赖飞行时间差实现 2~3 幅采样,难以满足对内爆过程中流体不稳定性增长、冲击波汇聚、热斑形成等连续演化过程的诊断需求。将质子照相与 CUP 相结合,可实现单发次数十幅连续时间采样,是实现高时间分辨极具潜力的研究方向,但需解决质子束编码、解码算法及探测器动态范围匹配等关键问题。数据处理上,面对单发次实验中产生的海量质子径迹图像,传统人工读数和半自动识别算法效率低下、主观性强。因此,构建大规模开源 CR-39 径迹图像数据集、预训练的径迹识别与分类深度学习模型、标准化能谱反演与电磁场重建算法库,成为人工智能时代提高数据处理效率的可行路径。

4 中子诊断技术

中子是聚变反应的直接产物,能够提供氘氚等离子体的燃烧信息^[83],反应产生的初级中子反映了聚变产额、燃烧速率和等离子体温度等信息^[84-86],测量散射中子也可获得燃料区域密度^[87]。因此,中子诊断技术可以获得燃料面密度、核燃烧历史、内

爆压缩对称性等丰富信息^[88]。下面将系统梳理中子能谱测量、产额测量、成像等技术的基本原理、发展脉络与最新研究进展,并讨论中子诊断技术面临的挑战和未来可能的发展方向。

4.1 中子能谱测量技术

聚变反应产生的中子携带着聚变等离子体的核心信息,其能谱特征直接反映离子温度和燃料面密度等参数^[89-91]。在聚变等离子体中,离子具有一定的速度分布,当聚变反应发生时,产物的质心也会发生运动,导致出射中子能量发生多普勒频移,通过测量中子能量的峰值宽度可以实现内爆核心温度测量。中子能谱的低能尾部则反映了中子从热斑向外输运过程中与稠密燃料的相互作用,含有燃料面密度的关键信息。当聚变中子穿透壳层时,会发生弹性散射损失能量,形成散射中子,通过诊断散射中子即可获取燃料面密度信息。

中子飞行时间法(neutron time-of-flight, nT-OF)和磁反冲谱仪(magnetic recoil spectrometer, MRS)是测量 ICF 内爆中子能谱较为成熟且应用广泛的技术^[88,92]。其中,nTOF 利用不同能量中子飞行速度不同的特点,通过记录中子从产生到抵达置于一定距离外的探测器飞行时间间隔反演出中子能量。nTOF 系统通常由快速响应的闪烁体探测器、高带宽数据采集系统以及精确的时间基准信号组成。当聚变中子入射闪烁体时,与闪烁材料发生核反冲产生荧光,荧光被光电倍增管或微通道板探测并转换为电信号,并由高速示波器或时间-数字转换器记录^[93]。李锋^[94]指出,初级中子与燃料发生散射产生的次级中子的飞行时间谱测量可以用于分析影响 ICF 内爆的物理过程。当燃料面密度接近 0.4 g/cm^2 时,次级中子产额与初级中子产额的比值对燃料面密度高度敏感,通过测量该比值并结合蒙特卡洛模拟反演,可实现对燃料面密度的诊断。

nTOF 技术时间分辨受限于时间间隔测量。电子计数法的时间测量精度较低;模拟内插法的电路实现困难,且连续测量能力较差,时间幅度转换测量范围较小;脉冲波形数字化方法精度虽高,但需对波形进行全采样,实现成本高,无法大规模应用^[95-96]。针对以上问题,魏凌峰等^[97]设计并实现了基于恒比定时方法(constant fraction discriminator, CFD)和 TDC-GP21 芯片的高精度中子飞行时间测量电路,通过优化定时甄别精度和时间数字转换分辨率,有效抑制由信号幅度变化引起的定时晃

动。ICF 实验中,等离子体温度信息的诊断精度得到提升,其时间分辨率优于 100 ps。然而,nTOF 时间间隔是指从聚变发生到 neutron 到达的时间间隔,聚变时间需要联用辐射接收仪器进行高精度交叉定时,会对高精度能谱测量提出挑战。聚变反应并非瞬时完成,而是存在一定持续时间,传统 nTOF 测量假设所有中子同时产生,但实际上不同时刻产生的中子叠加会影响能谱展宽。Grim 等^[98]提出共线双探测器系统用于消除对内爆时间测量的依赖,在同一飞行路径上设置两个探测器测量中子时间飞行谱图,以提升中子能谱测量精度。

为进行 nTOF 中子能谱三维内爆不对称性诊断,Weilacher 等^[99]研究了三维效应对中子谱反演的影响,指出背景扣除对于由散射中子谱推断面积密度至关重要,并验证了利用有限数量探测器重建三维面密度不对称性的可行性。考虑到面密度信息仍需多台 nTOF 联合诊断,Crilly 等^[89]建立了一种能从单个探测器测量的散射中子谱中提取面密度不对称性信息的分析模型,通过建立形变特征与不均匀性模式之间的映射关系,由实验散射中子谱反演出面密度分布信息。

nTOF 技术系统简单且易于实施,但能量分辨率受限于探测器本身时间响应、飞行距离以及中子产生时间的展宽。由于带电粒子在磁场中的偏转半径可被高精度测量,MRS 能量分辨率将优于 nTOF,其利用中子与氘或质子等轻核的弹性散射会产生反冲带电粒子,使用磁谱仪对带电粒子进行测量,可反演出中子能谱。MRS 系统由 3 部分组成:一是薄转换靶,将入射中子转化为反冲质子核;二是磁铁系统,对反冲粒子进行动量色散;三是位置灵敏探测器(如 CR-39 径迹探测器、闪烁光纤阵列或气体探测器),记录粒子位置和能量信息。由于 MRS 只能用于探测时间积分光谱,无法进行时间分辨测量,Kunimune 等^[100]提出具有时间分辨能力的 MRS,其布局如图 6 所示。MRS 通过氘化碳转化箔将聚变中子转化为反冲氘核,采用离子光学系统与脉冲扩展漂移管(pulse-dilation drift tube, PDDT)相结合的方式,实现中子能谱的高效率、高时间分辨测量。MRS 中子能谱测量不仅依赖于硬件系统,数据处理与谱反演算法同样重要,Casey 等^[101]基于 Geant4 全三维建模、多能量点原位标定和背景分析,提出基于响应矩阵的能谱反演方法,进一步提升了内爆中子能谱测量精度。

基于以上分析可知,中子能谱测量技术正沿着更高精度、更高时间分辨、更强反演能力的方向持续优化,在内爆诊断中发挥着重要作用。

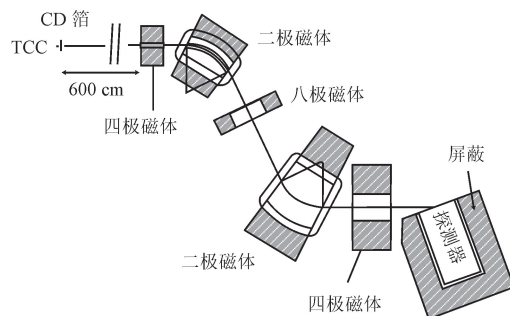


图 6 磁反冲谱仪布局示意^[100]

Fig. 6 Layout of MRS^[100]

4.2 中子产额测量技术

聚变反应产生的中子数直接反映聚变反应率大小,是评估内爆性能、计算能量增益的重要指标。ICF 中,2.45 MeV 的氘氘反应中子产额在 $10^9 \sim 10^{14}$ 之间,14 MeV 的氘氘反应中子产额在 $10^9 \sim 10^{19}$ 之间,其间跨越 10 个数量级,对中子诊断动态范围、绝对校准精度以及可靠性提出了挑战^[102]。

活化诊断法利用中子与特定材料发生核反应,生成具有特征 γ 辐射的放射性核素,通过测量活化产物放射性活度,反演得到照射期间中子注量和中子产额,被广泛应用于聚变中子产额测量^[103-104]。不同的活化材料具有不同的反应阈能,只有中子能量高于反应阈能时才能实现活化。根据诊断需求,In、Cu、Pr、Zr 等均可作为活化材料^[105-108]。

活化诊断不依赖于其他中子探测器读数,可以作为中子测量的基准。Landoas 等^[102]在激光兆焦耳装置(laser megajoule, LMJ)上对中子产额活化诊断法进行了验证与校准,并在 OMEGA 装置上进行了交叉比对,两套独立的活化诊断系统中子产额测量上的一致性优于 1%。Bleuel 等^[109]在 NIF 上构建了一套多用途的分布式中子活化诊断系统(fieldable neutron activation diagnostics, FNADs),在靶室周围布置多个活化样品位置,利用不同材料、不同阈能的活化探测器阵列,通过对中子产额、中子能谱以及中子空间分布进行多维度测量,获得了中子产额、燃料面密度和燃料整体运动信息,并发现燃料密度在两极与赤道之间存在显著差异。Yeaman 等^[110]进一步发展了基于 NIF 的 FNADs,在靶室周围布置多个活化探测器位置,实现对冷压缩氘氘燃料形状的有效控制与优化。

与活化法离线积分测量不同,闪烁体探测器法

能够实现中子产额的在线实时测量,其原理是利用中子与闪烁体材料发生核反冲产生荧光,荧光被光电倍增管或微通道板探测并转换为电信号,通过积分信号电荷或分析脉冲幅度得到中子产额信息。Lerche 等^[111]提出基于快响应塑料闪烁体 BC-422 的探测系统,利用厚度为 1 mm 的薄片闪烁体作为中子、光转换介质,并用光学条纹相机进行记录,实现对 $10^8 \sim 2 \times 10^{13}$ 范围的中子产额测量,且系统整体响应时间优于 25 ps。唐琦等^[112]发现 BC-422 型探测器的几何结构、闪烁体尺寸和封装材料对探测效率有重要影响,经优化设计,该探测器在大型激光装置上,能够实现对 10^8 量级低中子产额的精确测量,其时间分辨率达到 20 ps。鉴于塑料闪烁体难以从极强 X/ γ 本底中提取微弱的中子信号,且探测器需满足从低产额到点火级别跨越十个数量级的测量需求,但液体闪烁体具有更短的衰减时间和更弱的余辉效应。Stoeckl 等^[113]提出基于门控光电倍增管的液体闪烁体中子探测器,采用门控技术在强 X/ γ 射线到达期间关闭光电倍增管增益,有效抑制了背景信号。门控结束后再打开增益记录中子信号,首次实现快点火实验中的氘气中子实时测量。

综上所述,通过活化法与闪烁体法的优势互补、精确校准技术的不断完善以及多诊断系统的协同验证,中子产额测量技术正朝着更高精度、更宽量程、更强鲁棒性的方向持续发展。

4.3 中子成像技术

聚变中子能够穿透高密度的靶丸壳层和燃料区,从而携带热斑区域的空间分布信息^[114],因此,中子成像技术能够观测内爆压缩后热斑的尺寸、形状及对称性。

中子成像原理与 X 射线成像原理类似,但中子难以采用折射或反射光学元件进行聚焦,而是主要采用针孔成像和编码成像两种方式。其中,编码成像又分为半影成像和编码孔径成像^[115]。针孔成像空间分辨率主要受限于针孔直径的几何模糊和衍射效应^[116],通常在数十微米量级。陈法新等^[117]模拟了不同针孔直径、不同放大倍数下的成像效果,建立了针孔设计方案的优化判据,指出针孔直径的选择需要在空间分辨率与中子通量之间进行权衡,更小的针孔可获得更高的空间分辨率,但也会导致到达探测器的中子数减少,进而降低图像信噪比。为进一步提高成像品质,唐世彪等^[118]对中子针孔

成像系统进行了点扩展函数(point spread function, PSF)数学描述,为中子成像提供了定量化研究方案,使其从直观二维图像观测转向描述成像品质的 PSF 研究。在模拟点源偏离光轴时,预测了中子针孔成像 PSF 的非平稳特性,当点源偏离光轴入射时,部分中子会打在针孔的末端而产生强烈的散射,导致成像质量严重下降。Merrill 等^[119]在 NIF 装置上观察到了 PSF 的非平稳特性,中子针孔成像系统中,当点源位于中心轴上时,PSF 呈现对称三角形,点源偏离中心轴 50 μm 时,PSF 的形状发生了明显变化,不再是对称三角形,表现出非平稳特性,验证了唐世彪等^[118]的模拟结果。

中子针孔成像能力提升受限于空间分辨率与几何效率之间的相互制约,提高分辨率需减小针孔直径,而提高几何效率则需增加直径,但会降低中子源成像信噪比。Ress 等^[120]提出采用大孔径半影编码中子成像技术,半影成像孔径大于源尺寸,生成图像包括一个中心和一个环形半影,光源信息被编码在半圆中,通过解码算法可以恢复出源分布。该研究在 Nova 激光装置上首次获得了激光驱动 ICF 靶丸的中子图像,成功验证了半影编码孔径成像技术用于 14 MeV 中子成像的可行性^[121]。Disdier 等^[122]在 OMEGA 激光装置上采用双锥孔径半影技术和新的解卷积技术,将成像分辨率从 80 μm 提升至 45 μm ,半影成像技术实现从可行性验证向实用性转化的跨越。赵宗清等^[123]对中子半影成像系统进行了数值模拟研究,通过优化编码孔屏蔽材料选择和外径设计,采用钨或贫铀等高原子序数材料作为屏蔽层,有效降低了中子穿透屏蔽层产生的背景噪声,从而提高图像对比度和重建精度。由于成像系统的点扩散函数通常具有空间变异性,且探测器记录的中子计数受泊松噪声影响,维纳法和滤波自相关法等线性重构方法会导致重建结果的畸变^[124-126]。对此,Liu 等^[125]提出分子动力学非线性重建方法,解决了线性方法固有的 PSF 空间不变假设带来的畸变问题,有效处理了平滑本底干扰,提升了成像质量。余波等^[127]对线性维纳滤波和非线性动力学重建方法成像分辨率进行了定量分析,指出在线性重建时能达到 15 μm 分辨率,而非线性重建时能满足 5 μm 分辨率的诊断要求。Merrill 等^[119]在 NIF 装置上采用针孔、半影复合孔径,实现了 18 μm 分辨率,验证了研究的可靠性。Song 等^[128]将深度学习成功应用于半影图像重建,通过嵌入物理先验实现网络架构创新,解决了数据稀缺难题,在高噪声条件下展现出超越

传统算法的性能优势,为国内低产额装置中子成像诊断提供了技术支撑。

为解决针孔成像分辨率和透光率的矛盾,半影成像采取大尺寸孔径进行简单编码的技术方案,而编码孔径成像则是通过增加小孔数量提高透光率,但多孔成像会出现图像混叠^[129]。继 Dicke^[130]首次提出多孔编码成像之后,Ables^[131]又提出了编码与解码方法,利用带有特殊编码图案的孔径对中子源加以调制,从而在探测器上形成编码图像后通过解码算法重建源分布。与针孔成像相比,编码孔径成像具有更高的光通量利用率,能在相同的中子产额状况下取得更高的信噪比;相较于半影成像,编码孔径成像具有更优的空间分辨率、更稳定的重建性能,但其解析工作也更为复杂。Fenimore 等^[132]提出了均匀冗余阵列(uniformly redundant array, URA),消除了随机阵列解码后产生的伪影,解决了多孔清晰成像难题。Disdier 等^[133]提出环形编码孔成像,并在 OMEGA 装置上进行了实验,证实环形编码成像在达到 10 μm 成像分辨率时仍能保持较高的信噪比。Selwood 等^[134]提出带散射与部分衰减的编码孔径(coded aperture with scattering and partial attenuation, CASPA)技术,将散射和部分衰减纳入编码设计,而非将其视为需要消除的噪声源,实现了中子编码孔径成像原理创新,为未来更高分辨率、更低产额成像开辟了新路径。

4.4 小结

目前,中子能谱测量技术已由最初飞行时间法发展为 nTOF 和 MRS 共同构成的技术体系。nTOF 结构较为简单,便于多角度布置,通过对闪烁体材料、探测器设计和信号处理等进行优化改进,在离子温度测量和燃烧历史方面取得较大进步;MRS 拥有高能量分辨率,可用于中子精确谱线分辨及面密度测量。数据分析方法也从简单的反卷积逐渐过渡到基于物理模型的拟合分析和考虑三维影响的谱反演,谱反演技术也正在向更准确可靠的方向发展。

中子产额测量技术已形成活化法与闪烁体探测器法优势互补的体系。其中,活化诊断法在抗电磁干扰能力和绝对中子测量能力上具有优势,是中子产额测量的基准技术。在靶室周围布置多活化探测器阵列的 FNADs 系统,不仅能够对中子产额进行绝对测量,还能反演燃料面密度空间分布信息。闪烁体探测器法具有在线实时测量和高时间分辨能力,在获取聚变燃烧历史、监测脉冲波形方面具有优势。中子成像技术除了经典的针孔成像

技术和半影成像技术外,中子编码孔径成像技术正快速发展,有望成为高精度、高信噪比的中子成像新手段。值得注意的是,在内爆后期,硬 X 射线和 14 MeV 中子通量达到峰值,其瞬时计数率可超过探测器线性响应范围数个量级,导致光电倍增管、闪烁体探测器及半导体探测器出现“信号堆积”和“致盲”现象。这一效应在 nTOF 和中子成像诊断中尤为突出,需采用快速门控技术、抗辐射屏蔽和脉冲波形甄别等方法来恢复有效信号。

综上所述,中子测量技术在能谱、产额、成像 3 个方面协同发展,随着硬件创新与软件突破的深度融合、单视角测量向多维度成像的拓展升级,正向着更高精度、更宽量程、更强时间分辨、更全维度的方向持续演进。

5 总结与展望

激光惯性约束聚变内爆诊断技术是理解聚变物理、评估压缩性能、优化靶丸设计以及实现高能量增益目标的关键技术。本文对冲击波诊断、X 射线成像、质子测量和中子测量技术进行了系统梳理,分析了各领域面临的挑战与未来发展方向,其综合性能对比如表 1 所示。

冲击波诊断技术的发展从点测量到线、面、三维空间成像,从被动测量、主动干涉发展到主被动融合。被动式冲击波诊断技术通过光学设计、杂散光光谱滤波与门控探测等关键技术的突破,实现对冲击发光信号的高效收集与强背景抑制。主动式诊断技术中,线成像 VISAR 实现空间一维分布的高精度获取,双轴 VISAR 实现多点测量,广角 VISAR 则将诊断视角扩展至二维乃至三维空间。通过升级广角 VISAR 数据采集系统,结合压缩超快摄影技术等途径,未来有望实现对内爆压缩过程冲击波阵面的立体化重构。

X 射线成像技术包括自发光成像、背光成像与相衬成像 3 种形式。自发光成像从针孔成像发展到融合球面弯晶单色聚焦、多层膜 KB 镜多能段同步成像,通过与三维模拟结合,实现对内爆过程中三维扰动与界面混合的反演。皮秒激光驱动的高亮度 K_{α} 源、通过高 Z 元素混合靶调控产生的宽带均匀源等,为背光成像在等离子体状态诊断、不透明度测量等方面应用提供了从准单色到宽谱、从瞬态到多样化的光源选择。X 射线相衬成像对弱吸收材料和密度梯度具有敏感性,深

度学习相位恢复网络等技术的引入可为高精度 相位重建提供强大工具。

表 1 激光聚变内爆诊断技术综合性能对比

Table 1 Comprehensive performance comparison of laser fusion implosion diagnostic techniques								
技术类别	核心诊断方案	核心物理量	时间分辨率	空间分辨率	适用内爆阶段	核心优势	核心瓶颈	工程化成熟度
冲击波诊断	线成像 VISAR	冲击波速度、波形	20 ps	4 μm	内爆早期	高精度	诊断维度受限	高 (NIF, O-MEGA, 神光)
	广角 VISAR	冲击波速度、对称性	20 ps	4 μm	内爆早期	准三维,连续角度测量	装配要求苛刻,数据处理复杂	中 (实验室验证)
X 射线诊断	自发光成像	热斑形态、对称性	10~100 ps	3~5 μm	内爆中后期	无扰动,直观	图像解读依赖模拟	高 (NIF, 神光)
	背光成像	壳层密度、不稳定性	10~50 ps	5~10 μm	全过程	主动式,可穿透高面密度	可能引入微扰	高 (NIF, O-MEGA)
	相衬成像	弱吸收结构、界面	取决于光源	1~5 μm	静态/动态	高灵敏度,观测轻材料	相位恢复复杂,对光源相干性要求高	中 (同步辐射成熟,激光装置发展中)
质子诊断	被动式能谱	燃料面密度	时间积分	—	内爆后期	无扰动,直接测量	时间积分,信息单一	高 (OMEGA, NIF)
	主动式照相	电磁场、密度	~150 ps	10~50 μm	全过程	对电磁场敏感,可定量	源品质受限,图像解耦难	中 (OMEGA, NIF)
中子诊断	nTOF 能谱	离子温度、面密度	50~100 ps	—	内爆后期	系统简单,易部署	能量分辨率有限	高 (NIF, 神光)
	活化产额	中子产额	时间积分	—	内爆后期	绝对测量,抗干扰	离线测量,无时间信息	高 (NIF, LMJ)
	针孔/半影成像	热斑形状、对称性	时间积分	5~10 μm	内爆后期	直接观测热斑	几何效率与分辨率相互制约	中 (NIF, O-MEGA)

质子诊断技术已形成被动式时间积分测量、主动式单幅成像与高时间分辨多幅摄像协同发展局面。被动式质子诊断依托 CR-39 固体核径迹探测器,通过楔形范围滤波谱仪、紧凑型磁谱仪及 IP-CR-39 叠层组合探测器等技术实现对内爆燃料面密度、压缩对称性等关键参数的无扰动定量测量。而主动式质子照相则借助激光驱动质子背光源,将诊断能力从定性观测拓展至定量测量,并通过时间门控多探测器阵列方案和质子源脉宽压缩技术,将诊断从静态照相提升至 2~3 幅动态摄像。将质子照相与压缩超快摄影结合有望实现单次数十幅连续时间采样的质子照相。

中子诊断技术从中子能谱、中子产额和中子成像 3 个方面诊断 ICF 内爆信息。中子能谱测量方面,nTOF 与 MRS 协同诊断,实现对离子温度、燃料面密度及燃烧历史的诊断。中子产额测量方面,活化诊断法以其绝对测量能力成为基准技术,FNADs 系统实现对产额、能谱及空间分布的多维度测量,闪烁体探测器法则具有在线实时测量能

力,可以获取聚变燃烧历史。而中子成像技术所采用的针孔成像、半影成像和编码孔径成像 3 种构型各具优势,形成体系化中子成像手段。

在 ICF 中,任何单一诊断都无法完全复原三维内爆热斑形态,因此,发展多信使联合重构技术是一种值得考虑的方式,即采用贝叶斯推断或马尔可夫链蒙特卡洛 (Markov chain Monte Carlo, MC-MC) 方法,将不同视角、不同能段的 X 射线、中子和质子数据在同一个高维参数空间中进行强耦合约束,以求取唯一且物理自洽的内爆演化实解。该方法通过贝叶斯框架将中子图像、X 射线自发光、质子能谱等不同诊断数据的测量不确定性纳入同一概率模型中,利用 MCMC 方法在高维参数空间中采样,获得后验概率分布,从而实现多信使数据的协同约束。这一方法能够有效降低反演问题的病态性,为理解三维内爆不对称性、评估内爆性能提供关键工具。Gaffney 等^[135]开发的贝叶斯方法成功实现 NIF 实验中关键物理参数的高效校准,后续研究进一步结合贝叶斯推断与深度学习,实现了对内

爆性能的预测与不确定性的量化^[136]。Woo 等^[137]则利用多视角 X 射线图像实现三维热斑形态的精确反演。这些进展代表了诊断分析从单点测量向全局认知的转变。但是,目前的多信使联合诊断还处于同一诊断技术多视角联合或相近技术联合阶段。随着我国神光系列装置诊断能力的提升,发展各诊断技术联合的多信使贝叶斯同化分析技术,对于推动激光聚变研究具有重要意义。

辐射流体力学程序输出的是密度、温度、速度等基本物理量,而诊断仪器实际记录的是 X 射线通量、中子能谱、质子注量分布等测量信号,这中间需要进行信号转化处理。将合成诊断工具链深度集成到辐射流体力学模拟的后处理流程已成为一种发展趋势,Crilly 等^[138]基于 3D 辐射流体动力学(radiation hydrodynamics, RHD)程序 Chimera,开发了一套完整的合成核诊断套件,将三维模拟输出的密度、温度、速度场等信息进行后处理,生成中子能谱、初级/散射中子成像、中子活化、碳 γ 射线时间历史和成像等实验可观测信号,可直接用于实验结果对比。在 X 射线成像诊断中,Barbato 等^[58]开发了两套 X 射线成像合成诊断程序:PhaseX 用于 X 射线照相模拟,支持吸收模式和相衬模式,包含光线追踪传播物理;EmXI 用于 X 射线发射成像分幅相机和条纹相机信号模拟,实现 X 射线合成诊断。尽管目前高保真合成诊断取得了显著进展,但仍面临着众多挑战。从 RHD 模拟到诊断信号的正演过程本身就包含多重建模不确定性:光线追踪依赖于原子物理模型和不透明度数据,蒙特卡洛粒子运输的精度受限于核数据库和散射模型,且模拟与实验比对的结果严重依赖于输入模型的质量。如果输入模型部分特征未在 RHD 模拟中充分体现,合成诊断信号与实验数据的匹配就难以真实反映物理过程。

目前的多数 AI 算法验证仍局限于理想化仿真或离线数据,真实强噪声环境的鲁棒性测试及跨实验场景的迁移性研究尚不充分。针对深度学习在 ICF 诊断中面临的数据稀缺和泛化挑战,物理信息神经网络(physics-informed neural networks, PINNs)为其提供了一条有效解决路径^[139],与依赖海量标注数据的神经网络方法不同,PINNs 通过将控制物理方程作为约束项嵌入损失函数,使网络即使在缺乏实验数据的情况下也能学习物理一致的解。McDevitt 等^[140]利用 PINNs 求解 ICF 热斑中快离子分布,在没有实验数据的条件下成功描述了

Knudsen 层聚变产额降低效应。在 X 射线相位恢复领域,Yang 等^[141]发展了自监督物理信息生成网络,无需配准训练数据即可从单幅全息图中重建相位和吸收信息。针对 CUP 技术,Li 等^[142]提出多先验物理增强神经网络,将物理模型、稀疏约束和深度图像先验融入非训练框架,有效抑制了重建伪影并提升了空间分辨率。此外,不确定性量化技术的引入可评估网络预测的置信度,增强诊断结果的可解释性^[143]。

面向未来高增益点火实验,诊断系统在极端环境下的生存能力与测量可靠性是内爆性能评估的关键。除热辐射效应外,强电磁脉冲、硬 X 射线、中子瞬态致盲、高能靶碎片物理冲击等因素共同构成了诊断系统在综合性极端环境中需面临的挑战。ICF 实验通常使用对称靶,电磁脉冲强度有限,目前对电子器件主要采用物理屏蔽进行防护。VISAR 光学元件均位于远场,光学元件与靶之间存在隔板玻璃,高能碎片不会对光学元件造成损伤,X 射线诊断主要采用更换一次性防护膜和开发抗冲击光学材料等手段进行防护。未来,针对更加极端的诊断环境,需要不断改进防护措施,全面提升诊断系统在极端环境下的鲁棒性,为高增益点火实验提供可靠的诊断数据支撑。

参考文献

- [1] International Energy Agency. Global energy review 2025[R]. Paris: IEA, 2025.
- [2] 王志斌,沈炀,余羿,等.我国磁约束核聚变能源的发展路径、国际合作与未来展望[J].南方能源建设,2024,11(3): 1-13.
Wang Zhibin, Shen Yang, Yu Yi, et al. The development path, international cooperation and future prospects for magnetic confined fusion energy in China [J]. Southern Energy Construction, 2024, 11 (3): 1-13.
- [3] Nuckolls J, Thiessen A, Wood L, et al. The super-high density approach to laser-fusion CTR[R]. Berkeley: University of California, 1972.
- [4] Tollefson J, Gibney E. Nuclear-fusion lab achieves 'ignition': what does it mean? [J]. Nature, 2022, 612(7941): 597-598.
- [5] 滕晓丽,沈力.推动激光聚变点火实验研究和关键技术[J].激光杂志,2024,45(1): 19-25.
Teng Xiaoli, Shen Li. The experimental research and key technologies to advance laser fusion ignition[J]. Laser Journal, 2024, 45(1): 19-25.

- [6] Williams C A, Betti R, Gopalaswamy V, et al. Demonstration of hot-spot fuel gain exceeding unity in direct-drive inertial confinement fusion implosions[J]. *Nature Physics*, 2024, 20(5): 758-764.
- [7] Yan Ji, Li Jiwei, He Xiantu, et al. Experimental confirmation of driving pressure boosting and smoothing for hybrid-drive inertial fusion at the 100-kJ laser facility[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5782.
- [8] He Xiantu, Li Jiwen, Fan Zhengfeng, et al. A hybrid-drive nonisobaric-ignition scheme for inertial confinement fusion [J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(8): 082706.
- [9] 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: 物理学 力学 天文学*, 2009, 39(11): 1571-1583.
Jiang Shaoen, Ding Yongkun, Miao Wenyong, et al. Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China[J]. *Scientia Sinica-Physica, Mechanica & Astronomica*, 2009, 39(11): 1571-1583.
- [10] Craxton R S, Anderson K S, Boehly T R, et al. Direct-drive inertial confinement fusion: a review[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 110501.
- [11] 蒲显东, 陈伯伦, 黄天暄, 等. 激光间接驱动惯性约束聚变内爆物理实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(3): 137-148.
Pu Yudong, Chen Bolun, Huang Tianxuan, et al. Experimental studies of implosion physics of indirect-drive inertial confinement fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(3): 137-148.
- [12] Jacquemot S. Inertial confinement fusion for energy: overview of the ongoing experimental, theoretical and numerical studies [J]. *Nuclear Fusion*, 2017, 57(10): 102024.
- [13] Hurricane O A, Allen A, Bachmann B L, et al. Present understanding of ignition and gain using indirect-drive inertial confinement fusion target designs on the U. S. national ignition facility[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2025, 67(1): 015019.
- [14] Gopalaswamy V, Williams C A, Betti R, et al. Demonstration of a hydrodynamically equivalent burning plasma in direct-drive inertial confinement fusion[J]. *Nature Physics*, 2024, 20(5): 751-757.
- [15] Edwards M J, Campbell E M. 60 years of science in ICF: from conception to scientific breakeven on the national ignition facility[J]. *Reviews of Modern Plasma Physics*, 2025, 9(1): 30.
- [16] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, et al. Energy principles of scientific breakeven in an inertial fusion experiment[J]. *Physical Review Letters*, 2024, 132(6): 065103.
- [17] Van Kessel C G M, Sigel R. Observation of laser-driven shock waves in solid hydrogen[J]. *Physical Review Letters*, 1974, 33(17): 1020-1023.
- [18] 王涛. 强激光加载下材料冲击温度测量研究[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2013: 1-2.
Wang Tao. Research on shock temperature measurement of materials under intense laser loading[D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2013: 1-2.
- [19] 贺芝宇, 周华珍, 黄秀光, 等. 激光加载下铝材料的冲击温度测量[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(4): 39-46.
He Zhiyu, Zhou Huazhen, Huang Xiuguang, et al. Measurement of aluminum's shock temperature on SG-II high-power laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(4): 39-46.
- [20] Trainor R J, Shaner J W, Auerbach J M, et al. Ultra-high-pressure laser-driven shock-wave experiments in aluminum[J]. *Physical Review Letters*, 1979, 42(17): 1154-1157.
- [21] 王哲斌, 蒋小华, 李三伟, 等. 辐射驱动冲击波速度被动式测量[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(2): 375-380.
Wang Zhebin, Jiang Xiaohua, Li Sanwei, et al. Passive measurement of radiation driven shock velocity[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(2): 375-380.
- [22] Miller J E, Boehly T R, Melchior A, et al. Streaked optical pyrometer system for laser-driven shock-wave experiments on OMEGA[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(3): 034903.
- [23] 闫亚东, 孙策, 何俊华, 等. 激光核聚变中冲击波观测镜密封结构改进设计[J]. *润滑与密封*, 2007(8): 118-120, 139.
Yan Yadong, Sun ce, He Junhua, et al. The improved design of the hermetically sealed construction for shock wave viewing lens used in laser fusion[J]. *Lubrication Engineering*, 2007(8): 118-120, 139.
- [24] Yan Yadong, He Junhua, Xu Ruihua, et al. Optical system for passive laser fusion shock wave velocity measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(11): 2662-2668.
- [25] 闫亚东, 韦明智, 李奇, 等. 激光聚变冲击波速度测量光学系统设计[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(2): 259-266.
Yan Yadong, Wei Mingzhi, Li Qi, et al. Design of opti-

- cal system for laser fusion shock velocity measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29 (2): 259-266.
- [26] Barker L M, Hollenbach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface[J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(11): 4669-4675.
- [27] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, et al. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(11): 4916-4929.
- [28] Moody J D, Robey H F, Celliers P M, et al. Early time implosion symmetry from two-axis shock-timing measurements on indirect drive NIF experiments[J]. Physics of Plasmas, 2014, 21(9): 092702.
- [29] Yang Weiming, Duan Xiaoxi, Zhang Chen, et al. Optimization and application of shock wave measurement technology for shock-timing experiments on small-scale capsules [J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73 (12): 125203.
- [30] 吴宇际. 激光聚变中广角冲击波速度诊断方法及相关 VISAR 技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 44-59.
- Wu Yuji. Wide-angle shock wave velocity diagnostic method and related VISAR technology in laser fusion [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 44-59.
- [31] Wu Yuji, Guang Zanyang, Zhang Qing, et al. A method for diagnosing the implosion symmetry in inertial confinement fusion with wide-angle VISAR[J]. Nuclear Fusion, 2025, 65(2): 026047.
- [32] Zhang Qing, Wu Yuji, Yu Wenli, et al. The impact of preheating on wide-angle VISAR diagnostic in indirect-drive implosion experiments[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2025, 67(2): 025005.
- [33] Wu Yuji, Wang Feng, Wang Qiuping, et al. A high temporal resolution numerical algorithm for shock wave velocity diagnosis[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 8597.
- [34] Guan Zanyang, Wang Feng, Li Yulong, et al. High-accuracy VISAR velocity extraction via spatial phase-shifting and probability density function[J]. Optics Express, 2025, 33(19): 39889.
- [35] Gao Liang, Liang Jinyang, Li Chiye, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second[J]. Nature, 2014, 516(7529): 74-77.
- [36] Qi Dalong, Zhang Shian, Yang Chengshuai, et al. Single-shot compressed ultrafast photography: a review [J]. Advanced Photonics, 2020, 2: 014003.
- [37] Yang Chengshuai, Qi Dalong, Wang Xing, et al. Optimizing codes for compressed ultrafast photography by the genetic algorithm [J]. Optica, 2018, 5 (2): 147-151.
- [38] Guan Zanyang, Li Yulong, Wang Feng, et al. Study on the length of diagnostic time window of CUP-VISAR [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32 (12): 125208.
- [39] Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, et al. Laser compression of matter to super-high densities: thermonuclear (CTR) applications [J]. Nature, 1972, 239 (5368): 139-142.
- [40] Savage M E, Austin K N, Hutsel B T, et al. Pulsed power performance of the Z machine: ten years after the upgrade[C]//2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [41] 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 (10): 103501.
- [42] Davis A K, Michel D T, Craxton R S, et al. X-ray self-emission imaging used to diagnose 3-D nonuniformities in direct-drive ICF implosions[J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(11): 11E340.
- [43] Harding E C, Robertson G K, Dunham G S, et al. X-ray self-emission imaging with spherically bent Bragg crystals on the Z-machine[J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(8): 083509.
- [44] Yi Shengzhen, Zhang Feng, Huang Qiushi, et al. High-resolution X-ray flash radiography of Ti characteristic lines with multilayer Kirkpatrick-Baez microscope at the Shenguang-II update laser facility[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2021, 9: e42.
- [45] Yi Shengzhen, Mu Baozhong, Zhu Jingtao, et al. Time-resolved multispectral X-ray imaging with multi-channel Kirkpatrick-Baez microscope for plasma diagnostics at Shenguang-II laser facility[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(8): 083401.
- [46] Yi Shengzhen, Dong Jiqiang, Li Jiang, et al. Simultaneous high-resolution X-ray backlighting and self-emission imaging for laser-produced plasma diagnostics using a two-energy multilayer Kirkpatrick-Baez microscope[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2022, 7 (1): 015902.
- [47] Glendinning S G, Dixit S N, Hammel B A, et al. Com-

- parison of drive-seeded modulations in planar foils for 0.35 and 0.53 μm laser drive[J]. *Physical Review Letters*,1998,80(9): 1904-1907.
- [48] Landen O L, Farley D R, Glendinning S G, et al. X-ray backlighting for the national ignition facility[J]. *Review of Scientific Instruments*,2001,72(1): 627-634.
- [49] Kilkenny J D. Experimental results on hydrodynamic instabilities in laser-accelerated planar packages[J]. *Physics of Fluids B: Plasma Physics*,1990,2(6): 1400-1404.
- [50] 毕碧,周维民,单连强,等.皮秒短脉冲X射线背光诊断快点火靶丸压缩面密度[J].*强激光与粒子束*,2020,32(4): 77-81.
Bi Bi, Zhou Weimin, Shan Lianqiang, et al. Density diagnosis based on ps-duration-pulse X-ray backlighting for fast ignition compression[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,2020,32(4): 77-81.
- [51] Hu Xiyao, Zhang Yuxue, Qing Bo, et al. Optimization of 1.6-4.0 keV broadband X-ray backlighting source from high-Z mixture plasmas irradiated by intense nanosecond laser[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*,2025,67(5): 055028.
- [52] Opachich Y P, Heeter R F, Barrios M A, et al. Capsule implosions for continuum X-ray backlighting of opacity samples at the national ignition facility[J]. *Physics of Plasmas*,2017,24(6): 063301.
- [53] 钟肖彤,刘会亚,董全力,等.X射线球面弯晶成像性能分析及实验测试[J].*光学学报*,2023,43(19): 313-321.
Zhong Xiaotong, Liu Huiya, Dong Quanli, et al. Performance analysis and experimental testing of X-ray spherically curved crystal imaging[J]. *Acta Optica Sinica*,2023,43(19): 313-321.
- [54] Montgomery D S. Invited article: X-ray phase contrast imaging in inertial confinement fusion and high energy density research[J]. *Review of Scientific Instruments*,2023,94(2): 021103.
- [55] Snigirev A, Snigireva I, Kohn V, et al. On the possibilities of X-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation[J]. *Review of Scientific Instruments*,1995,66(12): 5486-5492.
- [56] Kozioziemski B J, Sater J D, Moody J D, et al. X-ray imaging of cryogenic deuterium-tritium layers in a beryllium shell[J]. *Journal of Applied Physics*,2005,98(10): 103105.
- [57] Montgomery D S, Nobile A, Walsh P J. Characterization of national ignition facility cryogenic beryllium capsules using X-ray phase contrast imaging[J]. *Review of Scientific Instruments*,2004,75(10): 3986-3988.
- [58] Barbato F, Savino L, Schiavi A, et al. Feasibility study of an XPCI diagnostic to observe the evolution of micro-voids in an ICF target[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*,2024,66(2): 025017.
- [59] 晏骥,江少恩,苏明,等.X射线相衬成像应用于惯性约束核聚变多层球壳靶丸检测[J].*物理学报*,2012,61(6): 492-500.
Yan Ji, Jiang Shaoen, Su Ming, et al. X-ray phase contrast imaging applied to characterization of multi-layer spherical shell targets for inertial confinement fusion[J]. *Acta Physica Sinica*,2012,61(6): 492-500.
- [60] Wang Kai, Lei Haile, Li Jun, et al. Characterization of inertial confinement fusion targets using X-ray phase contrast imaging[J]. *Optics Communications*,2014,332: 9-13.
- [61] Hodge D S, Leong A F T, Kurzer-Ogul K, et al. Single-shot in-line X-ray phase-contrast imaging of void-shockwave interactions in fusion energy materials[J]. *Physics of Plasmas*,2025,32(8): 083903.
- [62] Shi Kaijun, Zhang Xing, Wang Xin, et al. ICF-PR-Net: a deep phase retrieval neural network for X-ray phase contrast imaging of inertial confinement fusion capsules[J]. *Optics Express*,2024,32(8): 14356.
- [63] Li Mingtao, Shi Jiapeng, Wang Mingxun, et al. Dual-color and high-energy X-ray Kirkpatrick-Baez microscope for laser plasma research[J]. *Photonics*,2025,12(7): 631-641.
- [64] Solodov A A, Rosenberg M J, Stoeckl M, et al. Hot-electron preheat and mitigation in polar-direct-drive experiments at the national ignition facility[J]. *Physical Review E*,2022,106(5): 055204.
- [65] Döppner T, Dewald E L, Divol L, et al. Hard X-ray (>100 keV) imager to measure hot electron preheat for indirectly driven capsule implosions on the NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*,2012,83(10): 10E508.
- [66] Li C K, Séguin F H, Frenje J A, et al. Study of direct-drive capsule implosions in inertial confinement fusion with proton radiography[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*,2009,51(1): 014003.
- [67] Pearcey J A, Sutcliffe G D, Johnson T M, et al. Hohlraum fields with monoenergetic proton radiography at OMEGA [J]. *Applied Optics*,2024,63(10): A98-A105.
- [68] Seguin F H, Sinenian N, Rosenberg M, et al. Advances in compact proton spectrometers for inertial-confinement fusion and plasma nuclear science[J]. *Review of*

- Scientific Instruments, 2012, 83(10): 10D908.
- [69] Percy J A, Russell L, Kabadi N V, et al. Development of a compact magnetic spectrometer for use at the OMEGA laser facility and the national ignition facility [J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(10): 103509.
- [70] Schaeffer D B, Bott A F A, Borghesi M, et al. Proton imaging of high-energy-density laboratory plasmas [J]. Reviews of Modern Physics, 2023, 95(4): 045007.
- [71] Kugland N L, Ryutov D D, Plechaty C, et al. Invited article: relation between electric and magnetic field structures and their proton-beam images [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(10): 101301.
- [72] Deng Luan, Du Bao, Cai Hongbo, et al. Influence of coulomb scattering on the proton radiography of electric and magnetic fields in plasmas [J]. Physics of Plasmas, 2024, 31(6): 062709.
- [73] Walsh C, Clark D. Biermann battery magnetic fields in ICF capsules: total magnetic flux generation [J]. Physics of Plasmas, 2021, 28(9): 092705.
- [74] Borghesi M, Campbell D H, Schiavi A, et al. Electric field detection in laser-plasma interaction experiments via the proton imaging technique [J]. Physics of Plasmas, 2002, 9(5): 2214-2220.
- [75] Mackinnon A J, Patel P K, Town R P, et al. Proton radiography as an electromagnetic field and density perturbation diagnostic [J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(10): 3531-3536.
- [76] Tubman E R, Pollock B B, Higginson D P, et al. Demonstrating imaging plate detector stacks for proton radiography using exploding pusher capsules [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2024, 1060: 169027.
- [77] Sutcliffe G, Adrian P, Percy J, et al. A new tri-particle backlighter for high-energy-density plasmas [J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(6): 063524.
- [78] Li C K, Séguin F H, Frenje J A, et al. Proton radiography of dynamic electric and magnetic fields in laser-produced high-energy-density plasmas [J]. Physics of Plasmas, 2009, 16(5): 056304.
- [79] Simpson R A, Mariscal D A, Kim J, et al. Demonstration of TNSA proton radiography on the National Ignition Facility advanced radiographic capability (NIF-ARC) laser [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2021, 63(12): 124006.
- [80] Carrié M, Lefebvre E, Flacco A, et al. Effect of femto-second laser pulse duration on thin-foil accelerated protons [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010, 620(1): 36-40.
- [81] Apiñaniz J I, Malko S, Fedosejevs R, et al. A quasi-monoenergetic short time duration compact proton source for probing high energy density states of matter [J]. Scientific Reports, 2021, 11: 6881.
- [82] Liao Qi, Wu Mengjuan, Gong Zhe, et al. Enhanced laser proton acceleration by target ablation on a femto-second laser system [J]. Physics of Plasmas, 2018, 25(6): 063109.
- [83] Frenje J A. Nuclear diagnostics for inertial confinement fusion (ICF) plasmas [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2020, 62(2): 023001.
- [84] Johnson M G, Katz J, Forrest C, et al. Measurement of apparent ion temperature using the magnetic recoil spectrometer at the OMEGA laser facility [J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(10): 10I129.
- [85] Johnson M G, Casey D T, Frenje J A, et al. Measurements of collective fuel velocities in deuterium-tritium exploding pusher and cryogenically layered deuterium-tritium implosions on the NIF [J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(4): 042707.
- [86] Casey D T, Frenje J A, Johnson M G, et al. Measuring the absolute deuterium-tritium neutron yield using the magnetic recoil spectrometer at OMEGA and the NIF [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(10): 10D912.
- [87] Frenje J A, Casey D T, Li C K, et al. Probing high areal-density cryogenic deuterium-tritium implosions using downscattered neutron spectra measured by the magnetic recoil spectrometer [J]. Physics of Plasmas, 2010, 17(5): 056311.
- [88] Du Xue, Zhang Jianfu, Sheng Liang, et al. Design and simulated performance of a high-resolution magnetic proton recoil spectrometer for deuterium-tritium neutrons [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2023, 1057: 168790.
- [89] Crilly A J, Appelbe B D, Mannion O M, et al. The effect of areal density asymmetries on scattered neutron spectra in ICF implosions [J]. Physics of Plasmas, 2021, 28(2): 022710.
- [90] Mannion O M, Woo K M, Crilly A J, et al. Recon-

- structing 3D asymmetries in laser-direct-drive implosions on OMEGA [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(3): 033529.
- [91] Nguyen B, Lawrence Y, Wink C, et al. Modulated deuteron spectra observed with the Magnetic Recoil neutron Spectrometer at the National Ignition Facility [EB/OL]. (2025-09-04) [2026-03-26]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2509.06999>.
- [92] Frenje J A, Bionta R, Bond E J, et al. Diagnosing implosion performance at the National Ignition Facility (NIF) by means of neutron spectrometry [J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(4): 043014.
- [93] Moore A S, Schlossberg D J, Appelbe B D, et al. Neutron time of flight (nToF) detectors for inertial fusion experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2023, 94(6): 061102.
- [94] 李锋. ICF 实验 中子探测器研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007: 4-8.
- [95] 潘继飞, 姜秋喜, 毕太平. 基于内插采样技术的高精度时间间隔测量方法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2006 (11): 1633-1636.
- Pan Jifei, Jiang Qiuxi, Bi Daping. High precision time interval measurement method based on interpolating sampling technology [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2006(11): 1633-1636.
- [96] 乔晓峰, 康敏, 周荣华. 一种高精度时间间隔测量方法的研究 [J]. *科学技术与工程*, 2010, 10(1): 65-68, 80.
- Qiao Xiaofeng, Kang Min, Zhou Ronghua. Research for a method about the high precision time measurement [J]. *Science Technology and Engineering*, 2010, 10(1): 65-68, 80.
- [97] 魏凌峰, 周荣, 杨朝文. ICF 中子飞行时间测量电路设计与实现 [J]. *核技术*, 2015, 38(7): 53-58.
- Wei Lingfeng, Zhou Rong, Yang Chaowen. Design and realization of the ICF neutron time-of-flight measurement circuit [J]. *Nuclear Techniques*, 2015, 38(7): 53-58.
- [98] Grim G P, Mitrani J M, Chandler G A, et al. Time-of-flight vs time-of-arrival in neutron spectroscopic measurements for high energy density plasmas [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2024, 95 (8): 083519.
- [99] Weilacher F, Radha P B, Forrest C. Three-dimensional modeling of the neutron spectrum to infer plasma conditions in cryogenic inertial confinement fusion implosions [J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25 (4): 042704.
- [100] Kunimune J H, Johnson G M, Moore A S, et al. Phased plan for the implementation of the time-resolving magnetic recoil spectrometer on the national ignition facility (NIF) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, 93(8): 83511.
- [101] Casey D T, Frenje J A, Gatu Johnson M, et al. The magnetic recoil spectrometer for measurements of the absolute neutron spectrum at OMEGA and the NIF [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84 (4): 043506.
- [102] Landoas O, Glebov V Y, Rossé B, et al. Absolute calibration method for laser megajoule neutron yield measurement by activation diagnostics [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82(7): 073501.
- [103] Hahn K D, Cooper G W, Ruiz C L, et al. Fusion-neutron-yield, activation measurements at the Z accelerator: design, analysis, and sensitivity [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(4): 043507.
- [104] Youmans A E, Mitrani J M, McMahon M, et al. PAN-DA-FES: portable and adaptable neutron diagnostics for advancing fusion energy science [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2024, 52(10): 4833-4841.
- [105] Yeamans C B, Bleuel D L, Bernstein L A. Enhanced NIF neutron activation diagnostics [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10D315.
- [106] Meehan T, Hagen E C, Ruiz C L, et al. Praseodymium activation detector for measuring bursts of 14 MeV neutrons [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, 620 (2/3): 397-400.
- [107] Ruiz C L, Chandler G A, Cooper G W, et al. Progress in obtaining an absolute calibration of a total deuterium-tritium neutron yield diagnostic based on copper activation [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(10): 10D913.
- [108] Ruiz C L, Leeper R J, Schmidlapp F A, et al. Absolute calibration of a total yield indium activation detector for DD and DT neutrons [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(10): 4889-4891.
- [109] Bleuel D L, Yeamans C B, Bernstein L A, et al. Neutron activation diagnostics at the national ignition facility [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83 (10): 10D313.
- [110] Yeamans C B, Bleuel D L. The spatially distributed neutron activation diagnostic FNADs at the national ignition facility [J]. *Fusion Science and Technology*, 2017, 72(2): 120-128.
- [111] Lerche R A, Phillion D W, Tietbohl G L. 25 ps neu-

- tron detector for measuring ICF-target burn history [J]. Review of Scientific Instruments, 1995, 66(1): 933-935.
- [112] 唐琦,赵宗清,苏明,等. 超快中子探测器闪烁体性能计算[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(6): 1243-1246.
Tang Qi, Zhao Zongqing, Su Ming, et al. Performance calculation of ultra fast neutron scintillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(6): 1243-1246.
- [113] Stoeckl C, Cruz M, Glebov V Y, et al. A gated liquid-scintillator-based neutron detector for fast-ignitor experiments and down-scattered neutron measurements [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 10D302.
- [114] Volegov P L, Batha S H, Geppert-Kleinrath V, et al. Density determination of the thermonuclear fuel region in inertial confinement fusion implosions [J]. Journal of Applied Physics, 2020, 127(8): 083301.
- [115] 赵宗清,丁永坤,张颖,等. MCNP在惯性约束聚变核探测中的初步应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007(S1): 983-986.
Zhao Zongqing, Ding Yongkun, Zhang Ying, et al. Use of MCNP to simulate nuclear detection of inertial confinement fusion [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2007(S1): 983-986.
- [116] Fittinghoff D N, Birge N, Geppert-Kleinrath V. Neutron imaging of inertial confinement fusion implosions [J]. Review of Scientific Instruments, 2023, 94(2): 021101.
- [117] 陈法新,杨建伦,温树槐. ICF中子针孔成像数值模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2005(6): 883-887.
Chen Faxin, Yang Jianlun, Wen Shuhuai. Numerical simulation for neutron pinhole imaging in ICF [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005(6): 883-887.
- [118] 唐世彪,马庆力,邹继伟. 数值模拟快中子针孔成像系统的PSF[J]. 原子核物理评论, 2008(2): 139-143.
Tang Shibiao, Ma Qingli, Zou Jiwei. Numerical simulation on PSF of pinhole imaging system for fast neutron [J]. Nuclear Physics Review, 2008(2): 139-143.
- [119] Merrill F E, Bower D, Buckles R, et al. The neutron imaging diagnostic at NIF [J]. Review of Scientific Instruments, 2012, 83(10): 10D317.
- [120] Ress D, Lerche R A, Ellis R J, et al. Neutron imaging of inertial confinement fusion targets at Nova [J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(8): 1694-1696.
- [121] Ress D, Lerche R A, Ellis R J, et al. Neutron imaging of laser fusion targets [J]. Science, 1988, 241(4868): 956-958.
- [122] Disdier L, Rouyer A, Wilson D C, et al. High-resolution neutron imaging of laser imploded DT targets [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2002, 489(1/2/3): 496-502.
- [123] 赵宗清,丁永坤,刘东剑,等. 中子半影成像的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2006(7): 1203-1207.
Zhao Zongqing, Ding Yongkun, Liu Dongjian, et al. Numerical simulation of neutron penumbral imaging [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006(7): 1203-1207.
- [124] Rouyer A. A new simple method for decoding penumbra image: the filtered autocorrelation [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(3): 1234-1239.
- [125] Liu Dongjian, Zou Lian, Tang Changhuan, et al. A new reconstruction method based on classical molecular dynamics of neutron penumbral imaging in ICF [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2007, 578(3): 537-542.
- [126] Delage O, Lerche R A, Sangster T C, et al. SIRINC: a code for assessing and optimizing the neutron imaging diagnostic capabilities in inertial confinement fusion experiments [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 869-872.
- [127] 余波,应阳君,许海波. 惯性约束聚变的中子半影成像诊断系统的优化研究[J]. 物理学报, 2010, 59(6): 4101-4109.
Yu Bo, Ying Yangjun, Xu Haibo. Optimization of diagnostic system for neutron penumbral imaging in inertial confinement fusion [J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6): 4101-4109.
- [128] Song Jianjun, Zheng Jianhua, Chen Zhongjing, et al. Neutron penumbral image reconstruction with a convolution neural network using fast Fourier transform [J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(1): 013509.
- [129] 冯玉中,席禹,张译文. 中子编码孔径成像技术[J]. 现代物理知识, 2023, 35(6): 17-23.
- [130] Dicke R H. Scatter-hole cameras for X-rays and gamma rays [J]. The Astrophysical Journal, 1968, 153: L101.
- [131] Ables J G. Fourier transform photography: a new method for X-ray astronomy [J]. Publications of the Astronomical Society of Australia, 1968, 1(4): 172-173.
- [132] Fenimore E E, Cannon T M. Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays [J]. Applied Optics,

- 1978,17(3): 337-347.
- [133] Disdier L, Rouyer A, Lantuéjoul I, et al. Inertial confinement fusion neutron images[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(5): 056317.
- [134] Selwood M P, Fittinghoff D N. A coded aperture with sub-mean free-path thickness for neutron implosion geometry imaging on inertial confinement fusion and inertial fusion energy experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2023, 94(11): 113501.
- [135] Gaffney J A, Clark D, Sonnad V, et al. Bayesian analysis of inertial confinement fusion experiments at the National Ignition Facility[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2012.
- [136] Gaffney J A, Humbird K, Kritcher A, et al. Data-driven prediction of scaling and ignition of inertial confinement fusion experiments [J]. *Physics of Plasmas*, 2024, 31(9): 92702.
- [137] Woo K M, Betti R, Thomas C A, et al. Publisher's note: "analysis of core asymmetries in inertial confinement fusion implosions using three-dimensional hot-spot reconstruction" [J]. *Physics of Plasmas*, 2022, 29(10): 109902.
- [138] Crilly A J, Appelbe B D, McGlinchey K, et al. Synthetic nuclear diagnostics for inferring plasma properties of inertial confinement fusion implosions[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25(12): 122703.
- [139] Humbird K D, Peterson J L, Salmonson J, et al. Cognitive simulation models for inertial confinement fusion: combining simulation and experimental data[J]. *Physics of Plasmas*, 2021, 28(4): 042709.
- [140] McDevitt C J, Tang Xianzhu. A physics-informed deep learning description of Knudsen layer reactivity reduction[J]. *Physics of Plasmas*, 2024, 31(6): 062701.
- [141] Yang Xiaogang, Hailu D, Kulvait V, et al. Self-supervised physics-informed generative networks for phase retrieval from a single X-ray hologram[J]. *Optics Express*, 2025, 33(17): 35832.
- [142] Li Xing, Wang Siying, Chen Changheng, et al. Upconversion photoluminescence lifetime imaging via multi-prior physics-enhanced deep learning [J]. *Ultrafast Science*, 2025, 6: 124.
- [143] Lee J, Choi M, Jang H, et al. Evidential perfusion physics-informed neural networks with residual uncertainty quantification [EB/OL]. (2026-06-24) [2026-06-26]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.09359>.

Review on Diagnostic Techniques for Laser Inertial Confinement Fusion Implosion

WU Yuji, YE Jiajie*, ZHANG Qing, SHEN Ruiqiang, LUO Yibo, LI Yu, LIU Jiajun

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: The diagnosis of laser inertial confinement fusion (ICF) implosions is critical for understanding fusion physics, evaluating compression efficiency, and achieving ignition goals. Thus, it has significant importance for realizing stable high-gain ignition. Based on the implosion timeline, this study systematically reviewed the fundamental principles and research progress of four diagnostic techniques, namely shock wave, X-ray, neutron, and proton diagnosis methods. Shock wave diagnosis has evolved from point measurements to multidimensional imaging and integrated active-passive approaches. X-ray imaging has developed into a complementary system comprising self-emission, backlighting, and phase-contrast imaging. Proton diagnosis has expanded from passive time-integrated measurements to active single-frame imaging and time-resolved imaging. Neutron diagnosis has achieved comprehensive characterizations of the ion temperature, fuel areal density, and hot spot morphology through the synergistic development of energy-spectrum, yield-measurement, and imaging technologies. Consequently, this study analyzed the challenges faced by each diagnostic technique and comprehensively compared the four technologies and core sub-approaches across eight dimensions, namely the measurement core physical quantities, temporal resolution, spatial resolution, relative measurement error, applicable implosion stages, core advantages, core bottlenecks, and engineering maturity. It clarified the applicable boundaries and selection criteria for different technologies and discussed future trends toward higher precision, fuller dimensionality, higher temporal resolution, and intelligent development, aiming to provide systematic diagnostic technology references for the laser fusion ignition project of China.

KEYWORDS: laser inertial confinement fusion; shock wave diagnosis; X-ray imaging; proton diagnosis; neutron diagnosis

(编辑:于福兴)