我国激光间接驱动黑腔物理实验研究进展

李三伟^{1*}, 杨冬¹, 李欣^{2*}, 李志超¹, 郭亮¹, 谢旭飞¹, 况龙钰¹, 张璐¹, 霍文义², 吴畅书², 陈耀桦², 宋鹏², 张桦森², 曹柱荣¹, 胡昕¹, 侯立飞¹, 易荣清¹, 蒋小华¹, 李琦¹, 宋天明¹, 彭晓世¹, 徐涛¹, 理玉龙¹, 邓博¹, 邓克立¹, 王强强¹, 杨品¹, 黎航¹, 袁铮¹, 魏惠月¹, 刘祥明¹, 查为懿¹, 刘永刚¹, 王哲斌¹, 章欢¹, 詹夏宇¹, 陈黎¹, 梅雨¹, 陈韬¹, 李晋¹, 杨志文¹, 杜华冰¹, 车兴森¹, 杨轶蒙¹, 杨正华¹, 景龙飞¹, 何小安¹, 李朝光¹, 王鹏¹, 于瑞珍¹, 苏春晓¹, 陈铭¹, 崔廷莉¹, 王峰¹, 刘慎业¹, 杨家敏¹, 江少恩¹, 张保汉¹, 蓝可², 古培俊², 邹士阳², 郑无敌², 刘杰², 丁永坤²

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900;

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088

*联系人, 李三伟, E-mail: lisanwei@sohu.com; 李欣, E-mail: li_xin@iapcm.ac.cn

收稿日期: 2018-02-10; 接受日期: 2018-03-26; 网络出版日期: 2018-05-14

科学挑战专题(编号: TZ2016005)、国家重点研发计划(编号: 2017YFA0403300)和国家自然科学基金(编号: 11435011)资助项目

摘要 本文介绍了近年来我国在激光间接驱动惯性约束聚变中黑腔物理实验研究的进展. 我们在神光系列激光装置上开展了一系列黑腔物理分解实验和黑腔辐射场综合实验, 从多个方面研究了黑腔内部等离子体状态和辐射场特性. 为了提升精密化实验能力, 对黑腔物理实验主要诊断设备进行了不断优化改进、精密标定和一致性考核, 并对激光能量平衡和光斑稳定性的影响做了分析研究, 针对神光III原型装置从物理设计、诊断、制靶、驱动器等多方面不断优化完善, 建立了黑腔能量学精密物理实验能力, 获得了一套具有较高置信度的自洽的黑腔能量学实验数据, 同时初步探索研究了六孔球腔、三轴柱腔、贫铀腔、泡沫金腔等新型黑腔的辐射场特性. 最后介绍了2017年刚完成的黑腔Au泡膨胀特性和激光注入孔(Laser Entrance Hole, LEH)堵孔特性的实验研究. 这些实验获得了多个可重复、可理解、互相自洽的实验数据, 使我们对黑腔能量学和辐射场分布的影响因素和规律有了更深入的认识.

关键词 间接驱动, 惯性聚变, 黑腔物理, 能量学, 辐射流

PACS: 52.57.-z, 52.70.La, 52.50.Jm

激光惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)^[1,2]研究是当代物理学里十分活跃的前沿研究方向

之一, 对推动高能量密度科学与技术发展和聚变能源研发等具有重大意义. 在实验室聚变点火并获得能量

引用格式: 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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 065202

Li S W, Yang D, Li X, et al. Recent progress of hohlraum physics experiments in indirect-driven ICF in China (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 065202, doi: [10.1360/SSPMA2018-00035](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00035)

增益是全人类长久的梦想与追求. 美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)^[3]的建成和国家点火攻关计划(National Ignition Campaign, NIC)^[4]的实施已使实验室聚变研究取得重大进展, 尽管未能按期实现点火目标, 但已使实现点火这一里程碑性科学目标近在眼前. 科学界分析认为, 主要原因是目前对间接驱动激光核聚变靶中的激光等离子体参量不稳定性、内爆驱动的非对称性和流体力学不稳定性与混合等复杂物理问题的认识不足和控制效果欠佳^[5].

激光间接驱动ICF是指激光从黑腔激光注入孔(Laser Entrance Hole, LEH)进入黑腔(Hohlraum), 高功率激光沉积在黑腔壁上产生等离子体, 激光被等离子体吸收, 能量以电子热传导的方式向临界面内的等离子体传输, 大部分能量转换为X光, X光辐射在腔壁约束下, 经过多次吸收和再发射, 把能量输运到整个空腔内表面并产生光学厚的高温等离子体环境, 该环境使辐射场在空间均匀化, 并渐近热力学平衡, X光光谱逼近黑体辐射的Planck谱, 最终辐射烧蚀位于黑腔中心的含氘氚燃料靶丸使其内爆压缩并发生热核聚变. 这是一个复杂的多过程、多时空尺度的综合物理过程. 要想在有限的激光能量条件下实现点火, 对驱动靶丸的X光辐射场有很高的要求, 不仅要求有足够多的辐射能量能够被靶丸吸收, 而且流体力学稳定性对靶丸表面的辐射场的均匀性有很高要求, 并且对辐射场内的高频硬X射线辐射份额也有相应要求. 简单来说就是对黑腔辐射源的温度、均匀性和干净性有很高要求. 在激光间接驱动ICF中, 首先将激光驱动源能量转换为软X光能量, 再由软X光驱动含氘氚燃料的靶丸内爆, 故又称为辐射驱动内爆, 相比激光直接驱动, 它的优点在于可以降低激光束均匀性和流体力学不稳定性等要求.

激光间接驱动ICF研究包括理论、实验、激光器、诊断、制靶等5个领域, 要求这“五位”必须“一体地协调发展”, 只有这五方面同步精密才能达到物理实验数据精密化的目的, 实验与理论相结合是ICF研究的精髓. ICF实验物理的研究内容主要包括激光等离子体相互作用、黑腔物理、辐射驱动内爆物理、辐射流体力学和等离子体状态参数等方面的学科. ICF实验途径包括科学设计满足物理规律研究的靶型、利用诊断设备建立和优化实验方法、进行打靶获取实验数据、综合分析数据并提取物理规律, 主要以分解实验或综合

实验将复杂的ICF物理过程分解为若干子过程, 以便突出研究其中某一个物理现象及其子过程的物理规律. ICF诊断通常希望在同一发打靶实验中对等离子体发射的光学波段光子、X光、各种粒子进行时间、空间、能谱三方面同时诊断, 从而获知主要物理量及等离子体状态参数的时空演化过程.

黑腔物理是激光间接驱动ICF中最基础和重要的研究方向, 其主要内容是深入研究激光在黑腔中的传播和非线性相互作用、激光能量在腔壁中的沉积和X光转换过程、黑腔等离子体状态及其辐射特性的基础上, 通过优化黑腔结构和材料、优化激光波形等, 为靶丸实现聚变点火提供满足较高激光X光转换效率和较好辐射场空间对称性的高性能辐射驱动源. 另外, 针对不同应用需求创建相应的辐射源, 从辐射源的高温、干净性、平衡性、均匀性四个方面进行不同侧重的优化.

最近几年, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心与北京应用物理与计算数学研究所在神光III原型装置和主机装置上开展了一系列黑腔物理分解实验研究和综合实验研究, 从多个方面研究了黑腔内部等离子体状态和辐射场特性. 这些工作让我们对黑腔能量学和辐射场分布的影响因素和规律有了更深入的认识. 本文介绍了最近几年我国黑腔物理实验的研究进展, 包括黑腔物理实验诊断技术精密化研究、真空黑腔能量学配套数据定量研究、充气黑腔半定量研究、高性能黑腔探索研究以及一些黑腔物理基础研究, 并介绍了2017年度刚完成的Au泡膨胀实验和LEH激光堵孔实验结果.

1 黑腔物理精密实验能力

精密物理实验的研究能力非常重要, 精密的实验数据是研究物理规律的基础, 是优化黑腔结构、尺寸和材料的依据, 也是未来设计我国点火靶的重要条件, 因此获得高置信度的配套实验数据, 对建立高置信度的理论模拟程序具有重要的现实意义. 黑腔物理实验精密化水平体现为对实验条件、过程和结果的精密表征和控制. 首先, 需要对靶参数、激光参数与打靶方式等实验条件进行精密表征和控制, 进行不确定度评估, 并满足实验设计要求. 其次, 要求对实验可观测对象进行精密测量, 获取有效数据, 根据精密标定结果重建关

键物理量、物理图像或物理过程, 进行不确定度评估, 并满足实验设计要求. 图1展示了激光间接驱动ICF物理过程示意图, 下面简单介绍一下激光腔靶耦合过程、关键物理量及其实验诊断方法.

在激光能量到达黑腔内壁前, 激光首先会在腔内的大尺度低密度等离子体中传播, 这个过程会激发各种有害的激光等离子体不稳定性(Laser Plasma Instability, LPI)^[6,7], 包括受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS)、受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS)、双等离子体衰变(Two-Plasmon Decay, TPD)、自聚焦和成丝不稳定性等集体相互作用过程. LPI效应不仅会耗散入射激光能量而且还会产生超热电子, 这些高能电子能够直接进入靶丸加热氘氚燃料, 降低内爆压缩效率. 实验中激光等离子体不稳定性产生的散射光由散射光测量系统诊断. 散射光诊断系统^[8,9]包括测量打靶透镜立体角范围内散射光的全口径背向散射光测量系统(Full Aperture Backscatter Measurement System, FABS)和测量打靶透镜收光立体角范围外散射光的近背向散射光测量系统(Near Backscatter Measurement System, NBS).

穿过毫米尺度的低密度等离子体后, 没有被LPI损耗掉的激光会到达高Z材料腔壁并发生能量沉积和X光转换. 激光以逆韧致吸收的方式将能量传递给腔壁附近的高Z高密度等离子体, 获得能量的高Z离子通过各种原子过程发射X光(该区域称为光斑区等离子体). 光斑区发射的X光会进一步辐照黑腔内部其他未被激光直接照射的腔壁区域, 这些区域被X光加热后同样会电离产生等离子体并且再发射X光(该区域称为辐

射烧蚀再发射等离子体). X光辐射流在腔壁约束下经过多次吸收和再发射, 使整个黑腔内部等离子体状态接近热力学平衡, X光能谱也逐渐接近黑体辐射. ICF诊断的主要对象是光学波段光子、X光和聚变产物, 在热核聚变点火之前的实验, 由于核辐射不够强, X光是其主要的诊断对象. 实验中黑腔X光辐射流诊断由软X光能谱仪(Soft X-ray Energy Spectrometer, SXS)^[10]、全能段平响应XRD (Flat-response X-ray Detector, FXRD)^[11]和金M带平响应XRD (Au M-band Flat-response X-ray Detector, MXRD)^[12]这三种各有特点、互为补充的探测器构成, 光子能量0.1–10 keV的低能段X光能谱诊断通常由SXS谱仪和透射光栅谱仪完成.

黑腔物理实验中利用滤波荧光谱仪(Filter Fluorescer Spectrometer, FF)^[13]获得光子能量范围5–300 keV的硬X光能谱(超热电子韧致辐射谱), 推断超热电子温度和超热电子能量份额; 利用X光针孔相机^[14](X-ray Pinhole Camera, PHC或XPHC)获得光子能量>2.5 keV的时间积分X光图像, 监测激光瞄准精度、光斑位置、光斑形状、光斑大小、光斑移动情况和LEH激光注入情况, 判断是否发生LEH激光挂边等行为; 利用分频X光分幅相机(X-ray Framing Camera, XFC)^[15]获得黑腔不同区域等离子体发射的两个准单能(~0.8和~2.5 keV)空间二维分辨的X光分幅图像; 利用X光条纹相机(X-ray Streak Camera, XSC)^[16]获得黑腔不同区域等离子体发射的时间连续空间一维分辨的X光图像.

1.1 诊断设备精密化

在“十二五”初期先后建立了辐射驱动冲击波速度和黑腔辐射温度精密测量能力, 冲击波速度相对测量不确定度达到2%, 辐射温度相对测量不确定度达到3% ($K=1$), 近年来我们逐步完善了黑腔能量学特征量定量表征能力, 基本建立了黑腔辐射场综合诊断精密实验能力^[17,18].

诊断设备的标定工作对于精确处理实验数据起着至关重要的作用, 是精密物理实验的基础, 因此实验前均要对关键部件和重要诊断设备进行精密标定^[19]. 特别是从2008年以来, 在中国科学院高能物理研究所北京同步辐射源低能束线(4B7B束线, 0.1–1.6 keV)和中能束线(3B3束线, 2.1–5.5 keV)上开展了多轮精密标定实验, 获得了具有较高置信度的透射光栅衍射效率、

图1 (网络版彩图)激光间接驱动ICF物理过程示意图

Figure 1 (Color online) The schematic of different physical behaviors in indirect-drive ICF.

X光CCD灵敏度曲线、滤片透过率曲线、平面镜反射率曲线和XRD灵敏度曲线, 同时对光源的单色性、高次谐波以及源强稳定性、探测器响应一致性和数据采集统计误差等多项不确定因素进行了系统评估.

SXS测量0.1–5 keV范围内的X光辐射流能量、时间波形和X光光谱, SXS结构复杂体积庞大, 通常由10–15个测量通道组成, 每个低能通道由X光滤片、掠入射X光平面镜和真空X光二极管(XRD)构成, 每个高能通道由X光滤片和XRD构成, 通过滤片的低能截止和平面镜的高能截止把X光分割成不同的能区进行测量. 最近几年来我们逐步发展了FXRD, MXRD等测量精度高、使用简便的X光阵列探测器. 对于全能段X光辐射流(0.1–4.0 keV) FXRD能谱响应非一致性小于5%, 对于金M带辐射流(1.6–4.5 keV) MXRD能谱响应非一致性小于5%, 二者定量测量不依赖于被测辐射流的能谱结构, 相对测量不确定度小于10%. 图2和3分别展示了新型平响应FXRD, MXRD的理论设计曲线和同步辐射精密标定获得的整体灵敏度曲线^[20]. 在大能量激光打靶实验过程中, FXRD需要添加针孔阵列板^[21](又称中性滤片), 它具有两个优点, 其一是均匀衰减X光辐射流强度, 防止由空间电荷效应导致XRD阴极电流饱和, 其二是有效保护组合滤片免遭等离子体碎片破坏, 延长FXRD探测器的使用寿命.

多角度黑腔辐射流测量设备FXRD, MXRD是我国ICF实验研究中独有的诊断技术, 同一发次获得的不同角度辐射量结果能够反映光斑非光斑对比度, 小角度测量结果还能敏感地反映冕区等离子体运动特性, 对于研究理解黑腔中不同区域的X光辐射特性具有特别优势.

随着实验条件的改善, 认识水平的不断深入, 黑腔辐射场精密诊断能力逐步提高. 在辐射流精密化诊断过程中逐步解决了探测器对中可视化、电缆时间响应回校、时标对齐、等离子体碎片对滤片的损坏、示波器电磁干扰、未转换基频二倍频剩余光的影响、腔外辐射流本底等细节问题, 评估了激光挂边产生的辐射流本底对辐射流精密测量的影响^[22]. 利用上海光源和放射源建立了FF谱仪标定方法, 获得了探测系统能谱响应定量标定结果. 在2014年FF谱仪首次实现了量化, 目前能够定量获得腔内超热电子产生的韧致辐射谱^[23], 硬X光能量相对测量不确定度达到10%. 通过对散射光诊断系统FABS和NBS的逐步优化和全光谱定

图2 (网络版彩图)新型全能段平响应FXRD的理论设计曲线和标定后获得的整体灵敏度曲线^[11]

Figure 2 (Color online) The designed and calibrated response curve of the newly developed FXRD [11].

图3 (网络版彩图)新型金M带平响应MXRD的理论设计曲线和标定后获得的整体灵敏度曲线^[12]

Figure 3 (Color online) The designed and calibrated response curve of the newly developed MXRD [12].

量标定^[24], 目前能够获得散射光能量份额定量实验数据. 我们在神光III主机装置新建立了“快速标定”系统并对诊断系统衰减系数进行多次确认, 综合考虑了单波长绝对灵敏度、SRS宽谱范围相对灵敏度、近背向散射光空间分布, 但是由于散射光测量系统收光不全、光学元器件光谱响应非平整性以及光学元器件打靶损伤污染等因素导致目前散射光能量测量不确定度只能达到30%左右.

1.2 不同探测器的一致性

正式实验前均要开展FXRD的一致性考核实验. 考核实验在神光III原型装置上进行, 同一方位角安装

多套FXRD, 通过打腔靶和盘靶的方式来考核探测器的一致性, 然后选择性能较好的探测器(辐射流测量一致性好于 $\pm 4\%$)用于正式物理实验测量. 图4和5分别给出了12套FXRD测得的辐射流和辐射温度的一致性对比结果. 由图4可知, 峰值辐射流平均偏差为 $\pm 9\%$; 对应的等效峰值辐射温度平均偏差为 $\pm 2.2\%$, 如图5所示.

为了验证重要实验数据的可靠性, 在实验中同时采用不同探测器对同一个物理量进行观测. 图6给出了不同光学条纹相机获得的冲击波速度的一致性对比, 两台相机获得的冲击波速度差别小于0.5%, 由冲击波速度外推样品上感受到的辐射流强度与SXS谱仪测得的辐射流强度是自洽的^[25]; 图7给出了同一方位不同探测器获得的辐射温度的一致性对比, SXS谱仪与FXRD最大偏差为4.2%, 平均偏差约为1.1%. 在测量不确定度范围内三个探测器获得的辐射温度是一致的, 这些对比结果说明黑腔能量学重要实验数据是可靠的.

1.3 激光能量平衡和光斑稳定性对实验数据的影响

2013年以来, 基于神光III原型激光装置^[26](8束, 1 kJ/束/1 ns)的物理设计、诊断、制靶、驱动器等方面的技术进步, 神光III原型黑腔物理实验已经进入到深入、细致的研究阶段. 我们分析了多种实验条件(靶、驱动器)对实验结果的影响, 利用三维视角因子程序^[27]IRAD评估了束间能量差异对辐射流数据重复性的影响, 典型分析结果如图8所示, 其中方块为实验结果, 横线段为模拟结果. 假设激光总能量不变只改变

图4 (网络版彩图)同一方位角12套FXRD测得的辐射流一致性对比结果

Figure 4 (Color online) The measured radiation flux from 12 FXRD on the same view angle.

图5 (网络版彩图)同一方位角12套FXRD测得的辐射温度一致性对比结果

Figure 5 (Color online) The measured radiation temperature from 12 FXRD on the same view angle.

图6 (网络版彩图)1#光学条纹相机(a)和2#光学条纹相机(b)获得的冲击波速度的一致性对比

Figure 6 (Color online) The measured shock velocity by optic streak camera 1# (a) and optic streak camera 2# (b).

图 7 (网络版彩图)同一方位不同探测器获得的辐射温度的一致性对比

Figure 7 (Color online) The measured radiation temperature from different detectors on the same view angle.

图 8 (网络版彩图)模拟分析获得的激光束间能量差异对辐射流数据重复度的影响

Figure 8 (Color online) The influence of laser beam energy discrepancy on the simulated and measured radiation flux, respectively.

图 9 (网络版彩图)2013和2014年神光III原型黑腔物理实验光斑位置稳定性. (a) PHC图像; (b)焦斑质心位置

Figure 9 (Color online) Experiment results for laser spot location in 2013 and 2014. (a) Pinhole image; (b) centroid position of focal spot of laser beam.

N1束激光能量, 当N1束激光能量改变-20%, -10%, +10%, +20%时, IRAD计算给出了不同角度FXRD探测器模拟结果. 模拟结果显示, 如果某个探测器诊断视场中只有单个完整光斑, 而且该束激光能量相对该发次八路平均能量差异较大, 则会对数据重复性带来非常明显的影响. 为了在少量发次内就能获得高质量、高重复性的实验数据, 我们还需要更严格控制束间能量平衡.

此外, 我们统计分析了2013和2014年神光III原型黑腔物理实验的光斑位置稳定性, 如图9所示. 结果显示, 同一轮实验重复性较差(PV~100 μm), 不同轮实验之间存在系统性的差异(~90 μm). 分析表明, 神光III原型由于只有八路激光, 束间能量差异、光斑位置等因素对物理实验数据影响较大. 这些工作合理解释了实验中部分数据的反常规律. 将来随着物理理解的加深和实验水平的提高, 物理研究对精密化指标会提出更多更高的要求.

2 黑腔辐射场特性综合研究

2.1 激光束匀滑效果

用于ICF研究的大型激光器由于光程长、光学元件多, 输出的激光在未进入靶室时其波阵面就已经远远偏离理想的平面或球面, 造成聚焦或者离焦的焦斑光强空间分布不均匀. 因此, 仅仅通过离焦增大焦斑尺寸来降低激光功率密度(进而抑制LPI)是不现实的,

这也是大型激光器必须使用连续相位板(Continuous Phase Plate, CPP)等束匀滑技术^[28]改善光束质量的主要原因。

2012年以后神光III原型装置八路激光逐步建立并完善了CPP束匀滑能力。采用CPP束匀滑后, 激光焦斑质量得到了很大改善, CPP显著降低了激光焦斑中处于较高功率密度的能量份额, 改善了光强空间分布特性, 如图10所示。CPP显著降低了由于LPI效应导致的散射光能量份额, 提高了发次之间实验数据的稳定性。由于目前在ICF研究中广泛使用的辐射流体模拟还不能自洽计算LPI, 因此实验上获得的散射光数据, 能够为辐射流体模拟提供准确的输入条件。图11给出了有无束匀滑条件下散射光能量份额对比, 在 8×800 J无束匀滑激光注入真空腔条件下LPI较强, 散射光总能量份额达20%–45%, 当加CPP束匀滑后散射光总能量份额降低到10%以下; 扣掉散射光能量后理论模拟获得的时间分辨辐射温度曲线与实验结果基本一致, 如图12所示。

2.2 真空黑腔辐射场特性实验研究

黑腔物理综合实验能够同时获得多个特征物理量, 能较好地理论模拟研究提供约束条件, 也是综合检验黑腔辐射源性能的重要手段。随着神光III原型装置八路激光CPP束匀滑技术的应用和神光III原型精密化研究平台的逐步建立, 我们在同一发实验中同时获得了辐射流(多能段、能谱、多角度)、散射光(能量、时间波形、时间分辨光谱)、X光图像(多能段、时间分辨/时间积分)、辐射驱动冲击波速度等多个实验数据^[29,30]。

相比充气黑腔, 真空黑腔制备工艺成熟, 真空黑腔能量学是神光III原型装置上开展最多的研究。图13给出了无束匀滑条件下1 ns真空腔峰值辐射温度与激光能量的定标曲线。图13中黑色空心方块图形为神光II装置上由冲击波速度获得的等效峰值辐射温度, 黑色十字图形为神光II装置上SXS谱仪测得的峰值辐射温度; 红色十字图形为神光III原型装置上由冲击波速度获得的等效峰值辐射温度, 红色空心方块图形为神光III原型装置上SXS谱仪测得的峰值辐射温度。由图13可知, 激光与腔靶的能量耦合效率约70%; 在8 kJ, 1 ns激光条件下神光III原型运输腔(腔长2.1 mm, 腔直径 $\Phi 1.0$ mm, LEH $\Phi 0.6$ mm或 $\Phi 0.65$ mm)峰值辐射温度接近230 eV。图14给出了实验结果与LARED程序^[31]模拟结果的对比。可以看出, 扣除散射光能量之后的模拟结果与实验结果符合得很好。

图15给出了真空腔峰值辐射温度与激光能量的定标曲线, 在图15中红色符号为2012年以后在加CPP束匀滑条件下获得的实验数据。对比图13和15, 可以看出, 在加CPP束匀滑条件下激光与腔靶的能量耦合效率显著提升(大部分约80%)。图16给出了金M带能量份额随辐射温度的变化情况; 随着腔内峰值辐射温度的升高, 辐射流高能部分(金M带能量份额)比例从5%增大到30%。神光III原型CPP束匀滑技术的应用显著改善了激光焦斑质量、大幅降低了散射光能量份额, 大幅减小了由于较强LPI效应导致的物理实验数据涨落。另外采用Al, Ti双冲击波样品获得了样品上感受到的峰值辐射温度和金M带能量份额, 实验结果与理论模拟结果基本一致。

随着实验技术的持续改进和诊断精密化的不断推

图10 (网络版彩图)PHC获得的X光焦斑图像^[18]。(a) 无束匀滑、聚焦; (b) 无束匀滑、离焦2 mm; (c) CPP束匀滑
Figure 10 (Color online) PHC Laser spot image of focused without CPP (a), defocused by 2 mm without CPP (b), and focused with CPP (c) ^[18].

图 11 (网络版彩图)有/无束匀滑条件下散射光能量份额对比

Figure 11 (Color online) The fraction of scattering energy with CPP smoothing and without CPP smoothing, respectively.

图 12 (网络版彩图)黑腔辐射温度实验结果与模拟结果对比

Figure 12 (Color online) The experimental and simulated results of radiation temperature.

图 13 (网络版彩图)无CPP时实验获得的辐射温度与激光能量的定标曲线

Figure 13 (Color online) The scaling relationship between the radiation temperature and the laser energy without CPP smoothing.

图 14 (网络版彩图)实验获得的峰值辐射温度与LARED程序模拟结果对比

Figure 14 (Color online) Comparison results of measured peak radiation temperature and the simulated one with LARED.

图 15 (网络版彩图)真空腔辐射温度与激光能量的定标曲线

Figure 15 (Color online) The scaling relationship between the radiation temperature and the laser energy in vacuum hohlraum.

进, 多种实验方法从不同能段、不同观测角度能够同时定量测量多个物理量, 可以较全面准确地表征黑腔辐射源特性, 更多的约束条件促进了LARED-H模拟程序的持续改进, 加深了我们对激光腔靶耦合过程的物理解释. 实验和理论模拟结合验证了理论程序有关激光X光转换效率、光斑非光斑强度比和光斑位置移动模型的正确性.

2.3 充气黑腔辐射场特性实验研究

在激光间接驱动ICF中为了实现较高内爆速度和低熵压缩, 需要比较长的激光作用时间(~ 20 ns). 若使用真空黑腔, 那么在这么长的时间内, 被烧蚀加热的腔

图 16 (网络版彩图)真空腔金M带能量份额随辐射温度的变化^[18]

Figure 16 (Color online) Variation of the M-band fraction at different radiation temperature ^[18].

壁等等离子体由于在腔内不受到任何束缚, 会向腔轴和注入孔方向运动, 破坏辐射驱动对称性. 因此, 长脉冲驱动通常需要在黑腔中充入低密度低 Z 物质来抑制腔壁运动, 具体措施包括黑腔内壁涂低 Z 物质或者黑腔中充低 Z 气体. 选择特定的充气成分和密度需要综合平衡抑制打击点X光光斑运动与减小充气等离子体对激光的能量损耗的影响^[32].

对于充气黑腔, 通过持续优化充气黑腔设计和制备工艺后逐步解决了封口膜胶污染、充气管不伸入腔内装配技术、零时刻腔内气压监测与控制等因素导致的充气黑腔实验数据涨落较大的问题, 于2014年获得了一套神光III原型充气黑腔能量学半定量实验数据、充气黑腔光斑轴向和径向两个方向移动的实验数据. 图17给出了黑腔内不同充气压力条件下的辐射流和散射光能量份额, 随着充气气体 C_5H_{12} 压力的提高, 黑腔

图 17 (网络版彩图)黑腔内不同充气压力条件下的散射光能量份额和X光辐射流

Figure 17 (Color online) The scattering fraction and radiation flux in gas-filled hohlraum with various pressure.

辐射流逐渐降低, 对应的SBS逐渐降低, 但是SRS会逐渐提高.

黑腔内部可以分为激光打击点光斑区等离子体、辐射烧蚀再发射等离子体和激光直接辐照冕区等离子体这三种辐射和运动特性截然不同的区域. 其中光斑区由于X光发射强度最大, 非常敏感地影响着靶丸感受的辐射流对称性. 我们在神光III原型上也针对充气黑腔内部不同区域等离子体的运动开展了实验研究, 在深入分析国外已有研究的基础上, 2013年神光III原型光斑运动研究已经获得了光斑和冕区等离子体沿黑腔径向的运动数据, 2014年的相关研究则首次采用侧壁开缝的充气黑腔获得了不同能区X光发光区沿黑腔轴向方向的运动数据. 图18和19分别给出了XFC从靶室上极点获得的等离子体沿黑腔径向移动的实验数据和XFC从水平位置获得的等离子体沿黑腔轴向移动的数据. 尤其是上极点获得的时间分辨X光图像清晰, 能够

图 18 (网络版彩图)黑腔内等离子体沿黑腔径向方向时空演化实验数据^[18]. (a) XFC图像; (b) 实验结果与模拟对比

Figure 18 (Color online) The temporal evolution of the radial wall-plasma motion ^[18]. (a) XFC image; (b) comparison between the experimental results and the numerical simulation.

清楚辨认激光烧蚀的高温冕区等离子体边界和辐射烧蚀冷等离子体边界. 实验定量考察了两种初始充气条件下的冕区等离子体运动过程, 实验结果与理论模拟基本相符, 如图18所示. 神光III原型实验结果显示, 充气虽然能够抑制腔内等离子体过快运动、腔轴附近无高Z等离子体碰撞发光(图20)、发射M带的冕区等离子体运动速度更慢, 但缺点是充气腔LPI效应有所增强, 在加CPP条件下散射光总能量份额从真空腔约8%上升到充气腔约20%左右.

3 高性能黑腔探索研究

美国NIF建成以来, 已开展了一系列间接驱动ICF点火实验并取得了多项重要成果. 然而, 截至目前, 其

图 19 (网络版彩图)黑腔内等离子体沿黑腔轴向方向运动图像

Figure 19 (Color online) The temporal evolution of the axial wall-plasma motion.

图 20 (网络版彩图)真空黑腔和充气腔径向等离子体运动图像对比

Figure 20 (Color online) The radial wall-plasma motion in vacuum hohlraum and gas-filled hohlraum.

最重要的点火目标仍未实现. 通过对实验数据的细致分析, 人们发现辐射场的驱动不对称性和靶丸加持膜带来的混合是导致点火失败的主要原因^[33]. 理论模拟表明优化黑腔构型和腔壁材料可以提高黑腔能量效率和辐射对称性, 从而在相同条件下使点火更容易实现或者增加聚变能量产出.

3.1 六孔球腔

在激光聚变间接驱动ICF研究中, 黑腔几何构型与靶丸辐照均匀性密切相关. 传统的柱形黑腔与近年提出的橄榄形黑腔^[34]、椭球形黑腔^[35]均为含两个激光注入孔的柱对称腔型, 由于这些柱对称黑腔本身就不是球形结构, 因而在球形靶丸上的辐照均匀性较差, 均需采用激光多环注入、并利用复杂的技术手段调节束间功率平衡以获取满足内爆要求的辐照均匀性. 而且, 由于内外环激光所经历的等离子体状态与传输距离均不相同, 导致内外环背反份额也不同, 为了弥补内环驱动不足, NIF装置上采用复杂的三色光调节技术将外环激光的能量转移到内环^[36]. 事实上, 这种柱对称黑腔不仅需要复杂的技术手段来辅助获得所要求的靶丸辐照均匀度, 而且还需要精准的理论模型与数值模拟来指导实验. 因此, 如果能够设计出一种无需进行复杂的技术调节手段而本身就具有良好辐照均匀性的黑腔腔形, 将会大大降低对调节技术手段与理论模拟的苛刻要求, 从而也大大降低内爆点火的风险.

近年来北京应用物理与计算数学研究所的Lan等人^[37-39]提出了六孔球腔, 每个注入孔仅需单环激光入射, 这种球腔存在黑腔与靶丸半径之比的黄金比, 六孔球腔的辐照不均匀度存在极低值且远低于点火靶丸所需要的1%. 但六孔球腔潜在风险包括激光束从其他激光注入孔(LEH)穿出、激光功率密度过高导致的LPI风险、不同激光束烧蚀产生的bubble等离子体相互阻挡和残余Y4不对称性接近点火悬崖的问题. 其中为保证适当的能量耦合效率, 六孔注入必然导致LEH尺寸相对较小、激光功率密度高, 而高功率密度条件下的LPI问题是近期球腔实验关注的重点. 如何平衡激光注入和能量效率问题是六孔球腔设计的关键问题. 针对这些问题, 我国目前已经开展了多轮球腔分解实验研究, 包括点火高熵预脉冲激光注入实验、六孔球腔能量学实验和高激光功率密度球腔LPI等多项实验内容. 在两孔球腔注入实验中获得了类点火预脉冲

条件下不同激光注入孔LEH尺寸的球腔辐射场数据, 确定了当LEH尺寸达到 $\Phi 2.0\text{ mm}$ 以上时在点火预脉冲阶段LEH不堵孔. 在充气六孔球腔能量学实验中针对神光III主机激光装置^[40](48束, 60 TW)光束排布首次探索了六端打靶流程(图21), 考核了制靶、赤道区激光瞄准、成像型FXRD瞄准以及考核了冲击波靶屏蔽措施的有效性, 成功获得了六孔球腔能量学数据以及六孔球腔样品冲击波速度等实验数据, 定性理解了六孔球腔辐射流角分布特性, 初步给出了辐射温度评估方法^[41], 为下一步开展六孔球腔综合实验积累了丰富的实验经验, 为制靶、驱动器、诊断的进一步优化改进提供了依据. 对于高激光功率密度球腔LPI实验, 将激光功率密度提升至 $\sim 1.6 \times 10^{15}\text{ W/cm}^2$, 获得了稳定自洽的散射光实验数据, 散射光份额线性提升至 $<10\%$, 其中SBS占绝对主导.

3.2 六通柱腔和三轴柱腔

在最近的研究工作中我们又提出了六通柱腔^[42](图22(a))、三轴柱腔^[43](图22(b))、六管球腔等新型黑腔构型. 理论上讲这三种腔型大体相似, 均为六端激光注入, 它们兼具柱腔和球腔的一些优势. 相对两端注入的柱形黑腔, 六端注入没有内环激光使LPI问题简化, 对称性更好、可更好地兼顾不同的靶丸材料. 相对六孔球腔, 这三种腔型的激光传输通道等离子体状态更简单并且有柱腔实验和模拟的基础、LPI更好定量评估、对三维程序的需求较弱. 当然, 这三种腔型也面临与六孔球腔类似的问题, 为保证黑腔能量耦合效率, 黑腔尺寸(包括LEH尺寸)相对柱腔较小, 导致黑腔等离子体填充相对严重, 同时为了保证激光注入, 激光的

功率密度较高, 因此高功率密度、高填充条件下的LPI相关问题是这三种腔型研究的关键问题.

3.3 贫铀腔

黑腔辐射温度和黑腔能量耦合效率与腔壁材料、密度密切相关. Au黑腔的制备工艺成熟、化学性能稳定、寿命长, 所以实验大多采用Au材料制备的纯Au黑腔, 但纯Au黑腔产生的X光辐射场具有较强的M带X光发射^[44]. 由于M带光子能量较高, 能够穿透靶丸表层在冲击波抵达之前预热靶丸燃料, 从而显著降低内爆过程的流体力学效率. 为了减小预热影响, 目前的应对之策是在靶丸烧蚀层中进行多层梯度掺杂. 但掺杂本身又加剧了烧蚀层内各界面流体力学不稳定性. 理论研究表明, 纯U黑腔^[45]、Au-U-Dy鸡尾酒黑腔^[46]的辐射不透明度较高, 激光与腔靶的能量耦合效率较高, 但纯U极易氧化, 鸡尾酒黑腔制备工艺不成熟, 至今世界上还没有制备出满足理论设计需求的鸡尾酒黑腔.

U元素的原子序数比Au高, 理论上其X光的转换效率更大; 同时U元素的M带发射位于相比Au更高的能量区域, 理论上讲在目前ICF激光功率密度条件下硬X光能量份额更小. 我国在U腔制备方面, 开展了系统深入而卓有成效的研究. 在贫U材料表面保护层的选择及其制备工艺上, 从跟踪NIF采用的Au保护层开始到另辟蹊径独立自主地采用Al保护层和UN保护层. 到目前为止, 经过反复试验已经掌握了利用约 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 厚UN作为贫U材料保护层的黑腔制备的核心技术.

2014年在神光III原型上首次开展了利用UN作为表面保护层的铀腔能量学实验. 实验结果表明, UN能够很好地防止贫U材料的氧化和剥落, 同时可以得到

图 21 (网络版彩图)六孔球腔实验排布(a)和赤道区透射带通X射线成像系统诊断视场及测量结果(b)

Figure 21 (Color online) (a) The experimental configuration of the octahedral spherical hohlraum; (b) the view field and measured results of the band-pass transmission X-ray camera on equator.

图 22 (网络版彩图)新型黑腔示意图. (a) 六通柱腔; (b) 三轴柱腔

Figure 22 (Color online) The schematic of two newly hohlraum. (a) Six-cylinder-port hohlraum; (b) three-axis cylindrical hohlraum.

更为优化的辐射场. 图23给出了透射光栅谱仪获得的Au腔和U腔的X光能谱的对比结果. 相比传统的纯金黑腔, 带UN涂层的U腔产生的X光辐射场总能量更大, 而高能X光能量份额大幅度下降^[47,48], 在辐射温度220 eV条件下1.8 keV以上的硬X光能量份额降低约50%, 在辐射温度250 eV条件下下降约30%. 新型U腔在降低硬X光能量份额方面展示出非常优异的性能, 在消除硬X光预热、减少靶丸烧蚀层掺杂、提升内爆对称性等方面具有重要的应用价值. 同时, 作为我国贫U黑腔研究的阶段性成果, 带UN涂层U腔为将来进一步研究充气U腔、UN涂层泡沫化U腔等内容打下了坚实的基础.

3.4 泡沫金腔

为了提高黑腔靶丸耦合效率, 需要尽可能地减少腔壁所消耗的辐射能量. 理论研究表明, 低密度泡沫金向外扩散速度低, 动能损耗小, 可以提高黑腔辐射温度, 同时降低光斑运动速度, 从而可降低辐射对称性调控的难度^[49,50]. 为此我们在神光III原型装置上开展了泡沫金平面样品的验证实验, 实验结果显示泡沫金样品(密度 $\sim 0.4 \text{ g/cm}^3$) X光发射效率比固体金样品约高15%, 等离子体运动速度下降约一倍. 图24展示了泡沫金与固体金等离子体运动速度的对比结果.

在泡沫金平面靶实验数据基础上结合辐射流程序Multi1D, Multi2D的模拟结果, 于2017年9月在神光III主机激光装置上开展了泡沫Au腔腔内等离子体运动实验研究. 实验所用的泡沫金密度约为 0.6 g/cm^3 , 黑腔内填充0.15 atm的 C_5H_{12} 气体, 采用16束激光单环照射在柱状黑腔腰部, 每束三倍频激光能量2.5 kJ, 激

图 23 (网络版彩图)神光III原型装置上的纯Au腔和UN涂层U腔X光能谱对比^[47]

Figure 23 (Color online) The X-ray spectra from Au hohlraum and UN-coated DU hohlraum on SG-III prototype [47].

图 24 (网络版彩图)泡沫金与固体金等离子体运动速度对比

Figure 24 (Color online) The plasma moving velocity of foam Au and solid Au, respectively.

光脉冲长度3 ns, 利用上极点透射式分频X光分幅相机观测腔内等离子体的运动过程, 泡沫金壁黑腔内等离子体发光前沿平均运动速度约为 $480 \mu\text{m/ns}$, 而相同条件下固体金壁黑腔内等离子体运动速度约为 $600 \mu\text{m/ns}$. 该实验验证了理论模拟结果, 为未来黑腔优化设计提供了重要的实验依据.

4 黑腔物理基础研究

黑腔中不同等离子体区域由于其中主导物理过程不同而具有完全不同的辐射性质和运动特征. 这些等离子体及其代表的不同能段X光发射位置和运动特性包含了丰富的物理内涵, 如电子热传导能显著影响激光烧蚀以及X光发射位置、腔内激光烧蚀与辐射烧蚀

相互竞争决定了X光发射位置的运动. 开展黑腔分解实验研究有助于进一步理解激光注入、激光吸收和X光转换等物理过程.

4.1 单端驱动黑腔X光辐射特性

在神光III主机装置A6首束组磨合实验过程中采用八束激光单端注入黑腔, 在黑腔两端不同角度观测不同状态等离子体发射, 获得了腔壁、光斑区和腔内填充等离子体的X光辐射特性, 三温模拟给出的辐射温度高出实验值约10 eV, 而多群输运计算辐射温度峰值与实验结果接近, 通过该实验凸显了辐射输运效应, 明确了黑腔模拟输运建模的必要性^[51].

4.2 Au泡膨胀特性

黑腔中激光打击点离化的金等离子体会不断向腔中心膨胀形成金泡. 由于金泡等离子体状态及其运动特性对黑腔靶丸辐照对称性起主导作用, 2017年在神光III主机装置上开展了Au泡膨胀特性研究实验. 为了便于实验结果与模拟结果对比采用16束激光单环照射在柱状直筒腔(腔直径 $\Phi 2.8$ mm, 腔长2.08 mm)腰部, 形成二维柱对称分布等离子体. 实验关键诊断设备为一台首次应用于靶室上极点位置的透射式双频16分幅X光相机, 用于获取高时间分辨、高空间分辨的金M带、金N带X光图像.

实验获得了不同充气密度下Au泡膨胀尺度随时间的演化结果^[52]. 图25展示了位于腔轴方向的透射式

双频X光相机获得的在3 ns方波驱动条件下 C_5H_{12} 充气压力分别为0.4和0.15 atm时的Au泡膨胀尺度随时间的演化数据. 可以看出, 随着时间的推移, 由于腔壁等离子体逐渐向轴心方向移动, Au泡前沿的半径会逐渐减小. 当提高充气密度时, 能够有效地抑制金泡的膨胀, 因此提高充气密度能有效地降低Au泡的膨胀速度. 实验同时获得了多角度、多能段辐射流数据, 相同条件下不同发次之间数据重复. 与采用平均原子模型的传统模拟结果相比, 实验测得的Au泡膨胀速度较低. 目前超组态模型(Super-Transition Arrays, STA)计算效率较低, 短期内无法应用STA模型, 通常采用唯象模型. 唯象模型是在平均原子模型(Average Atom, AA)的基础上人为引入唯象参数, 在唯象模型中主要修正了电子能量和辐射能量比例, 利用本实验获得的Au泡膨胀数据进一步确认了唯象模型参数, 与平均原子模型相比, 唯像模型能更好地符合实验结果, 如图26所示.

4.3 激光注入孔(LEH)堵孔特性

目前在ICF研究中激光注入孔(LEH)的尺寸是点靶设计的难点, 过大的LEH会增加辐射流漏失降低能量利用效率, 过小的LEH会因为孔附近等离子体的干扰影响激光能量传输效率甚至改变激光能量沉积位置, 最终降低能量利用效率和破坏辐照对称性. 在大能量、长脉冲(~ 8 ns)激光驱动充气腔所形成的接近点火状态的辐射源环境中, 注入孔的堵孔行为极其复杂. 一方面堵孔受到LEH附近金等离子体、金泡区等离子

图 25 (网络版彩图)不同气压下冕区金等离子体膨胀X光图像^[52]. (a) 0.4 atm; (b) 0.15 atm

Figure 25 Color online) X-ray image of the coronal plasma expansion at gas-filled pressure of 0.4 (a) and 0.15 atm (b), respectively ^[52].

图 26 (网络版彩图)金泡前沿位置随时间变化的实验结果和模拟结果对比 [52]

Figure 26 (Color online) The edge position of the Au bubble of experimental and simulated result, respectively [52].

体、腔内低 Z 气体等离子体运动的共同作用和影响;另一方面堵孔涉及电子热传导、X光发射与吸收、辐射不透明度与辐射输运等多种物理机制的定量描述.理论上讲,在没有明显堵孔的情况下,LEH越小,辐射流漏失越少,黑腔保温效果越好,黑腔耦合效率越高,因此从点火靶黑腔设计的角度,往往采用合适的较小LEH,既没有堵孔现象,又可能最大地提高激光腔靶能量耦合效率.开展此项研究有助于二维辐射流体力学建模和数值计算方法检验,是点火靶设计验证的重要实验.

实验主要采用32路激光按照8 ns整形脉冲共80 kJ能量从两端注入充气柱腔,黑腔长2.2 mm,黑腔直径 $\Phi 2.2$ mm,一端敞口,另一端有注入口,注入口直径分为 $\Phi 1.0$ mm、 $\Phi 1.2$ mm和 $\Phi 1.4$ mm三种规格,充0.5 atm的 C_5H_{12} 气体.不同角度的平响应探测器FXRD用于测量多角度时间分辨辐射流强度,图27为上 42° FXRD、

下 42° FXRD获得的8 ns整形脉冲驱动下的注入孔LEH端和敞口端辐射温度曲线,从图27可以看出,LEH堵孔将引起两端辐射温度曲线的异常分离,不同尺寸注入孔的分离时刻从3.5 ns到6 ns不等,反应出不同LEH直径下堵孔开始的时间存在差异.这些定量数据对校准数值程序具有重要作用.

为了从实验上区分和观察腔内不同区域等离子体状态及其演化过程,我们在实验中首次同时采用两台高时间分辨大动态范围X光条纹相机(XSC)、两台高灵敏带通变频X光分幅相机(XFC),分别从靶室上极点、斜上 16° 、赤道面三个方位对LEH堵孔行为进行观测和研究.通过改变LEH尺寸获得了不同条件下高质量的等离子体X射线发射时空演化图像和高精度分幅辐射流以及散射光能量等数据,上极点斜 16° 针孔配X光条纹相机获得了不同条件下敞口端X光发射的时间连续空间一维分辨的X光(2.0–3.3 keV)图像,如图28所示,图像清晰地展示了激光弹着点移动、金泡等离子体膨胀、注入孔附近等离子体缩孔和堵孔等过程.上极点X光分幅相机获得的不同条件下注入孔X光发射图像清晰地展示了从激光预脉冲阶段的腔壁X光发射,到主脉冲前期的注入孔附近X光发射,再到主脉冲后期注入孔中心的X光发射的演化过程,主要实验数据相互自洽,由于驱动器输出稳定和靶质量较高,在相同条件下不同发次获得的实验数据一致性很好.

Au泡区域以及LEH附近等离子体状态是ICF数值模拟中最关键的几个区域之一,其等离子状态和位置随时间演化的精确诊断对于点火靶优化设计及其置信度论证具有非常重要的意义.通过Au泡膨胀实验和激光注入孔堵孔实验数据确定了一套唯象模型参数(平均原子模型中电子光子乘积因子 $C_{er}=2$, OPINCH不透明度参数乘积因子 $C_{op}=0.7$, 电子热传导限流因子

图 27 (网络版彩图)两端32束激光注入时上下 42° FXRD获得的辐射温度. (a) LEH $\Phi 1.4$ mm; (b) LEH $\Phi 1.2$ mm; (c) LEH $\Phi 1.0$ mm

Figure 27 (Color online) Measured radiation temperature from FXRD on up- 42° and down- 42° with 32 laser beams symmetrically incident on both sides. (a) LEH $\Phi 1.4$ mm; (b) LEH $\Phi 1.2$ mm; (c) LEH $\Phi 1.0$ mm.

图 28 (网络版彩图)靶室上极斜 16° 条纹相机XSC获得的敞口端X光发射时空演化图像

Figure 28 (Color online) Evolution of the X-ray radiation measured by XSC on the open end at up- 16° .

$f_e=0.08$), 利用该唯象模型可以大幅度节省模拟计算时间.

5 结论

从2012年以来神光III原型八路激光都已经具备CPP束匀滑能力, 相比以往大幅减小了由于较强LPI导致的物理实验数据涨落, 提高了现有驱动器输出能力下的有效能量利用率. 在此基础上, 我们开展了一系列黑腔物理实验研究, 获得了一套完整、可重复、能够理解的数据. 这些工作让我们对影响黑腔能量学和辐射场分布的因素和规律有了新的认识.

真空黑腔能量学研究从能量学角度梳理和分析了整个激光黑腔相互作用过程, 获得了散射光、辐射温度和不同能段辐射流的定标规律. 对于充气黑腔, 通过持续优化充气黑腔设计和制备工艺后逐步解决了封口膜胶污染、充气管不伸入腔内装配技术、零时刻腔

内气压监测与控制等因素导致的充气黑腔实验数据涨落较大的问题, 获得了一套充气黑腔能量学半定量实验数据以及充气黑腔光斑轴向和径向两个方向移动的实验数据. 新型U腔在降低高能X光能量(M带)份额方面展示出非常优异的性能, 低密度泡沫金腔在降低腔壁等离子体运动速度方面展示了良好的性能.

随着神光III主机的全面建成和投入运行, 长脉冲整形激光条件下的充气黑腔辐射源特性已经成为黑腔物理研究的重点. 由于激光驱动器单束激光功率密度继续增大, 加上充气黑腔的腔内等离子体尺度更大、状态更均匀, 两者都更易于激发较强的LPI, 因此类点火条件下黑腔等离子体状态和LPI也是未来黑腔物理研究的重点. 为了探索未来具有中国特色的点火之路, 进一步判断和理解六孔球腔、六通柱腔、三轴柱腔等新型黑腔的激光靶耦合物理过程, 在神光III主机装置上相应的分解实验也会进一步加强.

参考文献

- 1 Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain. *Phys Plasmas*, 1995, 2: 3933–4024
- 2 Atzeni S, Meyer-ter-Vehn J. The Physics of Inertial Fusion. Oxford: Oxford University, 2004

- 3 Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility. *Phys Plasmas*, 2004, 11: 339–491
- 4 Landen O L, Edwards J, Haan S W, et al. Capsule implosion optimization during the indirect-drive national ignition campaign. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 051002
- 5 Lindl J, Landen O, Edwards J, et al. Review of the national ignition campaign 2009–2012. *Phys Plasmas*, 2009, 21: 020501
- 6 Kruer W L. *The Physics of Laser Plasma Interaction*. Boston: Addison-Wesley, 1988
- 7 Hinkel D E, Rosen M D, Williams E A, et al. Stimulated Raman scatter analyses of experiments conducted at the national ignition facility. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 056312
- 8 Wang F, Peng X S, Yan Y D, et al. Backscattered light diagnostic technique based on Shenguang-III laser facility (in Chinese). *Chin J Laser*, 2015, 42: 0902011 [王峰, 彭晓世, 闫亚东, 等. 基于神光III主机的背向散射光诊断技术. 中国激光, 2015, 42: 0902011]
- 9 Wang F, Peng X S, Yang D, et al. Backscattered light diagnostic technique on Shenguang-III prototype laser facility (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 175202 [王峰, 彭晓世, 杨冬, 等. 基于神光III原型的背向散射实验技术研究. 物理学报, 2013, 62: 175202]
- 10 Jiang S E, Ding Y K, Miao W Y, et al. Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China (in Chinese). *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 39: 1571–1583 [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. 中国科学G辑: 物理学 力学 天文学, 2009, 39: 1571–1583]
- 11 Li Z, Jiang X, Liu S, et al. A novel flat-response X-ray detector in the photon energy range of 0.1–4 keV. *Rev Sci Instrum*, 2010, 81: 073504
- 12 Guo L, Li S, Zheng J, et al. A compact flat-response X-ray detector for the radiation flux in the range from 1.6 keV to 4.4 keV. *Meas Sci Tech*, 2012, 23: 065902
- 13 McDonald J W, Kauffman R L, Celeste J R, et al. Filter-fluorescer diagnostic system for the national ignition facility. *Rev Sci Instrum*, 2004, 75: 3753–3755
- 14 Jiang S E, Yu Y N. X-ray pinhole camera used on Shenguang II facility (in Chinese). *Sci Tech Eng*, 2005, 5: 1713–1716 [江少恩, 于燕宁. 用于神光II激光装置的X光针孔相机. 科学技术与工程, 2005, 5: 1713–1716]
- 15 Cheng J X, Yang C B, Wen T S, et al. Gated MCP soft X-ray picosecond multi-framing camera (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 1999, 11: 596–600 [成金秀, 杨存榜, 温天舒, 等. 门控MCP软X射线皮秒多分幅相机. 强激光与粒子束, 1999, 11: 596–600]
- 16 Hu X, Jiang S E, Cui Y L, et al. A time-resolved three-channel soft X-ray spectrometer (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2007, 56: 1447–1451 [胡昕, 江少恩, 崔延莉, 等. 一种时间分辨三通道软X射线光谱仪. 物理学报, 2007, 56: 1447–1451]
- 17 Li S W, Song T M, Yi R Q, et al. Quantitative study of radiation temperature for gold hohlraum on SG- II laser facility (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2011, 60: 055207 [李三伟, 宋天明, 易荣清, 等. 神光 II 激光装置黑腔辐射温度定量研究. 物理学报, 2011, 60: 055207]
- 18 Yang D, Li S W, Li Z C, et al. Hohlraum physics study on Shenguang-III prototype (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2015, 27: 032014 [杨冬, 李三伟, 李志超, 等. 神光III原型黑腔物理实验研究. 强激光与粒子束, 2015, 27: 032014]
- 19 Pérez F, Kemp G E, Regan S P, et al. The NIF X-ray spectrometer calibration campaign at omega. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 11D613
- 20 Yi R Q, Zhao Y D, Wang Q P, et al. Characteristic study and application of the soft X-ray beam line 4B7B on BSRF (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2014, 34: 1034002 [易荣清, 赵屹东, 王秋平, 等. 北京同步辐射装置4B7B软X射线标定束线的性能研究及应用. 光学学报, 2014, 34: 1034002]
- 21 Li Z, Zhu X, Jiang X, et al. Note: Continuing improvements on the novel flat-response X-ray detector. *Rev Sci Instrum*, 2011, 82: 106106
- 22 Yang D, Li Z, Guo L, et al. The influence of laser clipped by the laser entrance hole on hohlraum radiation measurement on Shenguang-III prototype. *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 033504
- 23 He X A, Li C G, Yi R Q, et al. Sensitivity calibration of NaI(Tl) scintillator based on single photon counting (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2015, 27: 032022 [何小安, 李朝光, 易荣清, 等. 单光子计数闪烁探测器灵敏度标定方法. 强激光与粒子束, 2015, 27: 032022]
- 24 Xu T, Wei H Y, Peng X S, et al. Calibration of backscattered light diagnostic system on Shenguang III prototype facility (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2014, 26: 032001 [徐涛, 魏惠月, 彭晓世, 等. 神光III原型装置背向散射光诊断系统的标定. 强激光与粒子束, 2014, 26: 032001]
- 25 Li Y, Huo W Y, Lan K. A novel method for determining the M-band fraction in laser-driven gold hohlraums. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 022701
- 26 Li P, Jing F, Wu D S, et al. Power balance on the SG-III prototype facility. *SPIE*, 2012, 8433: 843317
- 27 Jiang S, Huang Y, Jing L, et al. A unified free-form representation applied to the shape optimization of the hohlraum with octahedral 6 laser entrance holes. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 012702

- 28 Moody J D, MacGowan B J, Rothenberg J E, et al. Backscatter reduction using combined spatial, temporal, and polarization beam smoothing in a long-scale-length laser plasma. *Phys Rev Lett*, 2001, 86: 2810–2813
- 29 Zhang H, Yang D, Song P, et al. X-ray conversion efficiency and radiation non-uniformity in the hohlraum experiments at Shenguang-III prototype laser facility. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 112709
- 30 Huo W Y, Ren G, Lan K, et al. Simulation study of hohlraum experiments on SGIII-prototype laser facility. *Phys Plasmas*, 2010, 17: 123114
- 31 Zhang H, Yang D, Song P, et al. Investigating the hohlraum radiation properties through the angular distribution of the radiation temperature. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 082708
- 32 Schneider M B, MacLaren S A, Widmann K, et al. The size and structure of the laser entrance hole in gas-filled hohlraums at the national ignition facility. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 122705
- 33 Hinkel D E, Berzak Hopkins L F, Ma T, et al. Development of improved radiation drive environment for high foot implosions at the national ignition facility. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 225002
- 34 Amendt P, Ho D D, Jones O S. High-density carbon ablator ignition path with low-density gas-filled rugby hohlraum. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 040703
- 35 Masson-Laborde P E, Monteil M C, Tassin V, et al. Laser plasma interaction on rugby hohlraum on the omega laser facility: Comparisons between cylinder, rugby, and elliptical hohlraums. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 022703
- 36 Davis A K, Cao D, Michel D T, et al. Isolating and quantifying cross-beam energy transfer in direct-drive implosions on omega and the national ignition facility. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 056306
- 37 Lan K, Liu J, Li Z, et al. Progress in octahedral spherical hohlraum study. *Matter Radiat Extremes*, 2016, 1: 8–27
- 38 Lan K, Liu J, Lai D, et al. High flux symmetry of the spherical hohlraum with octahedral 6LEHs at the hohlraum-to-capsule radius ratio of 5.14. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 010704, arXiv: 1311.1263.
- 39 Huo W Y, Li Z, Chen Y H, et al. First investigation on the radiation field of the spherical hohlraum. *Phys Rev Lett*, 2016, 117: 025002
- 40 Zheng W, Wei X, Zhu Q, et al. Laser performance upgrade for precise ICF experiment in SG-III laser facility. *Matter Radiat at Extremes*, 2017, 2: 243–255
- 41 Xie X, Li Z, Li S, et al. Radiation flux study of spherical hohlraums at the SGIII prototype facility. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 112701
- 42 Li X, Wu C S, Dai Z S, et al. A new ignition hohlraum design for indirect-drive inertial confinement fusion. *Chin Phys B*, 2016, 25: 085202
- 43 Kuang L, Li H, Jing L, et al. A novel three-axis cylindrical hohlraum designed for inertial confinement fusion ignition. *Sci Rep*, 2016, 6: 34636, arXiv: 1605.03787.
- 44 Guo L, Li S, Li Z, et al. Multiple angle measurement and modeling of M-band X-ray fluxes from vacuum hohlraum. *Phys Plasmas*, 2016, 23: 092709
- 45 Döppner T, Callahan D A, Hurricane O A, et al. Demonstration of high performance in layered deuterium-tritium capsule implosions in uranium hohlraums at the national ignition facility. *Phys Rev Lett*, 2015, 115: 055001
- 46 Wilkens H L, Nikroo A, Wall D R, et al. Developing depleted uranium and gold cocktail hohlraums for the national ignition facility. *Phys Plasmas*, 2007, 14: 056310
- 47 Guo L, Ding Y, Xing P, et al. Uranium hohlraum with an ultrathin uranium–nitride coating layer for low hard x-ray emission and high radiation temperature. *New J Phys*, 2015, 17: 113004, arXiv: 1410.7514.
- 48 Guo L, Yi T, Ren G, et al. Experimental and simulation studies on radiative properties of uranium planar target coated with an ultrathin aluminum layer. *Nucl Fusion*, 2018, 58: 026020
- 49 Zhang L, Ding Y, Lin Z, et al. Demonstration of enhancement of X-ray flux with foam gold compared to solid gold. *Nucl Fusion*, 2016, 56: 036006
- 50 Zhang L, Dong Y S, Jing L F, et al. Experimental study on improving hohlraum wallreemission ratio by low density gold foam (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2016, 65: 015202 [张璐, 董云松, 景龙飞, 等. 低密度泡沫金提升黑腔腔壁再发射率的实验研究. *物理学报*, 2016, 65: 015202]
- 51 Zhao Y, Zou S, Li S, et al. Characterizing the hohlraum radiation via one-end driven experiments. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 072714
- 52 Guo L, Li S W, Li X, et al. Study on the movement of gold bubble plasma in hohlraum (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2017, 29: 120102 [郭亮, 李三伟, 李欣, 等. ICF黑腔金泡等离子体运动研究. *强激光与粒子束*, 2017, 29: 120102]

Recent progress of hohlraum physics experiments in indirect-driven ICF in China

LI SanWei^{1*}, YANG Dong¹, LI Xin^{2*}, LI ZhiChao¹, GUO Liang¹, XIE XuFei¹,
KUANG LongYu¹, ZHANG Lu¹, HUO WenYi², WU ChangShu², CHEN YaoHua²,
SONG Peng², ZHANG HuaSen², CAO ZhuRong¹, HU Xin¹, HOU LiFei¹, YI RongQing¹,
JIANG XiaoHua¹, LI Qi¹, SONG TianMing¹, PENG XiaoShi¹, XU Tao¹, LI YuLong¹,
DENG Bo¹, DENG KeLi¹, WANG QiangQiang¹, YANG Pin¹, LI Hang¹, YUAN Zheng¹,
WEI HuiYue¹, LIU XiangMing¹, ZHA WeiYi¹, LIU YongGang¹, WANG ZheBin¹,
ZHANG Huan¹, ZHAN XiaYu¹, CHEN Li¹, MEI Yu¹, CHEN Tao¹, LI Jin¹,
YANG ZhiWen¹, DU HuaBing¹, CHE XingSen¹, YANG YiMeng¹, YANG ZhengHua¹,
JING LongFei¹, HE XiaoAn¹, LI ChaoGuang¹, WANG Peng¹, YU RuiZhen¹,
Su ChunXiao¹, CHEN Ming¹, CUI YanLi¹, WANG Feng¹, LIU ShenYe¹, YANG JiaMin¹,
JIANG ShaoEn¹, ZHANG BaoHan¹, LAN Ke², GU PeiJun², ZOU ShiYang²,
ZHENG WuDi², LIU Jie² & DING YongKun²

¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

² Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China

In recent years, hohlraum experiments have been performed extensively on Shenguang series laser facilities in the context of laser indirect-drive inertial confinement fusion. Multiple aspects about the hohlraum energetics, drive symmetry and plasma condition are studied by a variety of methods resolving different photon ranges and multiple viewing areas. To improve the experimental uncertainty, several diagnostics are optimized and calibrated, also the power balance and pointing accuracy of laser beams are evaluated and improved. These works lead a rapid progress on hohlraum experimental capabilities and a series of successful experimental campaigns. In order to further optimize the hohlraum performance, other hohlraum geometry (the spherical hohlraum with six LEHs and the cylindrical hohlraum with six LEHs) and hohlraum wall material (depleted Uranium and foam Au) are explored as well. Hohlraum experiments and modeling on Shenguang series laser facilities demonstrated quantitative understanding of the laser conversion, X-ray ablation and plasma motion in different regions.

indirect drive, inertial fusion, hohlraum physics, energetics, radiation flux

PACS: 52.57.-z, 52.70.La, 52.50.Jm

doi: [10.1360/SSPMA2018-00035](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00035)