间接驱动内爆物理实验研究进展

蒲昱东¹, 黄天暄^{1*}, 缪文勇¹, 康洞国², 高耀明², 邹士阳², 葛峰峻², 陈伯伦¹, 蒋炜¹, 余波¹, 晏骥¹, 张兴¹, 陈忠靖¹, 陈家斌¹, 唐琦¹, 宋仔峰¹, 刘慎业¹, 江少恩¹, 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, E-mail: huangtx2013@aliyun.com

收稿日期: 2018-01-10; 接受日期: 2018-03-26; 网络出版日期: 2018-05-10

国家重点研发计划(编号: 2017YFA0403300, 2017YFA0403200)、国家自然科学基金(编号: 11775201, 11505169)和科学挑战专题(编号: TZ2016001)资助

摘要 激光惯性约束聚变(ICF)研究具有十分重要的实际价值和科学意义, 同时也是依赖整体国力的大科学工程。内爆实验, 集成理论、制靶、诊断和驱动器等多方面工作, 是ICF研究水平的最终体现。我国从20世纪80年代实现激光驱动内爆出中子, 到90年代至21世纪头十年实现以冲击压缩为主的近一维内爆, 并且惯性压缩开始起作用, 直至近期实现中等收缩比、方波驱动、以惯性压缩为主的近一维内爆, 内爆实验水平不断进步, 内能性能显著提升。随着神光-III(SG-III)装置的建成, 同时在美国点火实验受挫的形势下, 我国内爆实验向更高收缩比、更低燃料熵增的点火参数区间迈进, 将面临重大机遇与挑战。

关键词 惯性约束聚变, 内爆实验, 神光装置

PACS: 52.57.Az, 52.57.Fg

1 引言

王淦昌先生于1964年提出了利用激光照射含氘固体靶产生中子的设想, 并预言这可能是实现热核聚变的新途径。1976年, 王先生在中国工程物理研究院重新启动了激光聚变研究计划, 在高功率激光装置研制、微靶制备、诊断技术和靶物理方面取得了长足的进步^[1-3]。同一时期^[4], 如图1所示, 1976年3月到5月, 美国利弗莫尔实验室(LLNL)首次开展了激光间接驱动内爆实验(Cyclops激光, 单路, 100 J, 基频; 计算辐射温

度约100 eV, 没有实验测量值)。由于靶丸壳层厚度(1 μm 玻璃)与辐射自由程相当, 内爆行为与爆推靶相似, 氘氚(DT)中子产额 $1 \times 10^4 - 1 \times 10^5$ 。1977-1978年, LLNL尝试在Agrus(2束, 基频, 1-2 kJ)上实现10倍-100倍液氘压缩密度的间接驱动内爆, 但由于超热电子的影响, 没有获得可观测的中子产额。1978-1979年, LLNL在Shiva(20束, 基频, 10 kJ)上开展多种腔型的间接驱动内爆实验, 采用涂CH玻璃靶丸(靶丸参数: 150 μm 内径、5 μm 玻璃、烧蚀层15 μm CH、10 mg/cc的DT气体), DT中子产额 $1 \times 10^6 - 1 \times 10^9$ 。实验设计辐射

引用格式: 蒲昱东, 黄天暄, 缪文勇, 等. 间接驱动内爆物理实验研究进展. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 065204

Pu Y D, Huang T X, Miao W Y, et al. Progress of indirectly driven implosion experiments (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 065204, doi: [10.1360/SSPMA2018-00011](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00011)

图 1 (网络版彩图) 中国和美国 ICF 研究发展简图

Figure 1 (Color online) Evolution of ICF research in China and US.

温度约 200 eV, 但由于黑腔等离子体填充导致高达 50% 的激光能量转换成超热电子, 实际上当黑腔填充等离子体密度小于 1/4 临界密度时(激光等离子体不稳定性-LPI 发展还不严重), Shiva 装置上所能达到的辐射温度只有约 130–140 eV. 此外, 在 20 世纪 70 年代后期, Shiva 上开展了双壳内爆实验, 认识到由于流体力学不稳定性, 要实现高增益, 双壳靶的尺度不能太小, 导致所需的点火能量高于中心点火靶设计. 这一时期的主要实验结果表明: 由于对黑腔物理认识的不足, 导致激光-X 射线转化效率偏低, 超热电子份额偏高, 无法达到预期的内爆压缩性能. 理论分析表明, 采用倍频激光, 可以提高激光-X 射线转化效率, 降低超热电子份额, 减弱预热影响, 从而提升内爆压缩密度. 这也为后续激光间接驱动研究的发展指明了方向.

1984 年在四川绵阳建成星光-I(XG-I)单路激光装置, 基频光 70 J(脉宽 1 ns). 1985 年在上海光学精密机械研究所(上海光机所)建成了神光-I(SG-I)双束激光装置, 单束基频输出能量为 500–700 J, 脉宽为 500–800 ps. 1986 年, 在 SG-I 上开展基频光直接驱动爆推靶实验^[5], 脉冲 100 ps, 靶丸内径 100 μm , DT 充气压力 10 atm (1 atm = 101325 Pa), DT 中子产额 5×10^6 . 1989 年 SG-I 一束改为二倍频, 用于研究倍频光与等离子体相互作用规律. 同

一时期, 美国 ICF 已由基频光转移到倍频光. 1983 年建成了 Novette(Nova 的两束原型, $2\omega_0$, 7–9 kJ), 开展了黑腔实验, 耦合效率达到 97%, 辐射温度达到 172 eV. 1985 年建成 Nova(10 束, $3\omega_0$, 30 kJ), 保持耦合效率的情况下, 辐射温度达到 200–225 eV, 开展了对称性调控、流体力学不稳定性、脉冲整形以及综合内爆实验, 获得丰富的实验数据. 80 年代后期, 根据 Nova 和 H/C 地下核试验的结果, 能源部(DOE)考虑建造基于钕玻璃激光技术的 LMF 激光装置, 实现 200–1000 MJ 的能量增益. 为此, 对 ICF 计划开展了 DOE 的内部评估和国家科学院(NAS)主持的外部评估(国会要求). 评估结果建议在未来 10 年内建造 1–2 MJ 激光装置, 实现点火和中等程度(~ 10)的能量增益. 其前提条件是: 在 Nova 上成功完成系列实验, 即完成所谓的 Nova 技术合同(NTC), 包括黑腔激光等离子体(HLP)和流体等当(HEP)两部分内容.

1991 年, 在 SG-I 上实现了基频光间接驱动(辐射驱动和混合驱动)内爆出中子^[6,7]. 实验采用了三种类型十种不同结构参数的黑腔, 玻璃靶丸内径 100 μm , 壳厚 4 μm , DT 中子产额 1×10^3 – 1×10^5 . 1993 年 XG-I 升级为 XG-II, 基频光输出 250 J(脉宽 1 ns), 增加了倍频晶体, 可以输出二倍频和三倍频激光. 同年, 我国 ICF 研究纳

入国家高技术研究发展计划(“863”计划), 获得国家层面持续稳定支持. 从1994年开始, 联合实验室计划用3年时间将2路基频SG-I升级成8路三倍频SG-II, 靶物理实验研究转移到XG-II上进行, 并开展SG-II的靶物理设计和数值模拟工作. 1997年, 开展SG-III主机的概念设计, 计划2000年完成TIL (Technical Integration Line), 十年完成60 kJ SG-III的建造. 同一时期, 美国于1993年完成了“精密Nova项目”, 将打靶精度从100 μm 提升至RMS值30 μm , 功率平衡提升近两倍(峰值功率平衡5%, 低台阶功率平衡10%), 满足NTC提出的开展1:10对比度整形脉冲实验的要求. 开展了HEP系列实验, 其目的是定量理解在尽可能接近点火条件下的流体力学不稳定性及混合的发展规律, 以及不对称性对内爆性能的影响. HEP实验分为5个系列, 以收缩比(Cr)、扰动增长因子、和靶丸外表面粗糙度为控制参数, 其中收缩比通过燃料充气压力控制(充气压力从50 atm到5 atm, 对应收缩比变化从10增加到22), 扰动增长因子通过脉冲整形和壳层掺杂等手段控制(方波与对PS26整形脉冲, 壳层掺Ge与不掺), 靶丸外表面粗糙度通过激光在靶丸表面烧蚀形成凹坑控制(RMS值范围0.03–1 μm). 低收缩比(10)、低增长因子(10)HEP3实验(方波, 不掺Ge), 中子产额实验值与一维模拟值之比($\text{YOC}_{1\text{D}}$)达到60%–80%($1\text{D } Y_n - 1 \times 10^9$); 低收缩比(10)、高增长因子(100)HEP4实验(PS26 (1:5), 掺Ge), $\text{YOC}_{1\text{D}}$ 达到30%. 后期的HEP4实验, 以及高收缩比(20)、高增长因子(100)HEP5实验在Omega装置上开展, 其目的是利用Omega较多激光路数的特点, 增加驱动环向对称性, 以获得更好的内爆性能. Omega上HEP4实验 $\text{YOC}_{2\text{Dclean}}$ 达到70%–80%; HEP5实验 $\text{YOC}_{2\text{Dclean}}$ 达到30%–50%(Cr 22–17). 1999年, Nova关闭. 90年代开展的另一项很重要的工作就是点火靶的设计.

2000年SG-II基频出光, 2001年SG-II三倍频出光, 输出能量 $8 \times 250 \text{ J/1ns}$, 成为我国ICF研究主力实验装置^[8], 开展了多轮黑腔^[9]、流体力学不稳定性^[10]以及内爆实验, 并开展了诊断技术研发工作^[11]. 2007年SG-III原型建成, 8路激光, 输出能量10 kJ(1 ns). 2015年SG-III主机建成, 48路激光, 输出能量180 kJ(3 ns)^[12]. 美国于2009年建成NIF, 随后开展了3年的国家点火攻关计划(NIC)^[13]. 虽然未能如期实现点火, 但是仍然没有放弃努力成为第一个实现点火的国家^[14]. 从2012年起进入

NIC后时代, 采用高熵内爆实现了 α 粒子自加热, 取得了ICF历史上里程碑式的成果^[15]. 到2020年, 美国希望回答在NIF上能否实现点火, 以及实现点火需要什么样的条件.

2 SG-II之前

这一时期, 实验主要在上海的SG-I上开展, SG-I是2路基频激光装置, 于1985年建成, 输出脉宽0.1–1 ns, 输出总能量1.6 kJ (1 ns, 基频), 两束激光能量不平衡小于10%.

研究的重点是黑腔物理, 包括激光-X射线转化规律、激光等离子体相互作用、超热电子产生等问题^[16,17]. 作为综合集成实验, 内爆方面开展了直接驱动和间接驱动实验, 首次实现了激光驱动内爆出中子.

2.1 SG-I直接驱动内爆实验

1986年12月, 在SG-I装置上开展了直接驱动爆推靶实验^[5]. 采用玻璃靶丸, 直径80–100 μm , 充DT气体, 压力10–15 atm, DT原子比2:1, 掺Ne原子比20%–30%. 两束基频100 J/束, 脉宽60–100 ps. 为均匀照射靶丸, 采用离焦打靶方式, 靶面功率密度标称值 $7.5 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$.

实验DT中子产额 5×10^6 , 用X射线针孔图像获得的热斑尺寸, 估计出收缩比为4.3, 实现了约1倍液D密度的压缩; 用散射光二极管及等离子体卡计给出激光到靶丸能量耦合效率, 约28%.

理论上用“一次冲击加等熵压缩”模型理解实验结果^[18]. 爆推靶内爆过程可以近似为两个阶段, 第一个阶段, 壳层整体加热后向两侧飞散, 向内飞散的物质在燃料气体区产生强冲击, 可以用强冲击Hugoniot关系得到燃料气体区波后压力、速度; 第二阶段, 冲击波过后燃料气体向中心汇聚压缩, 以实现出中子所需的高温、高压条件, 这一过程可以近似为等熵压缩过程, 压力和密度满足等熵关系. 按照上述理解, 结合实测靶丸吸收激光能量, 可以估计出燃料压缩密度、中子产额等主要实验结果.

2.2 SG-I间接驱动内爆实验

1990年10月, 在SG-I装置上开展了烧蚀型间接驱动内爆实验^[6]. 所谓烧蚀型, 即指烧蚀层较厚, 超过了

电子碰撞自由程(直接驱动)或辐射自由程(间接驱动), 驱动能量局域沉积, 烧蚀壳层材料, 产生烧蚀压力驱动靶丸内爆.

实验采用高斯波形, 脉宽(FWHM)约800 ps, 基频700 J/束. 采用多种黑腔结构和打靶方式. 靶丸内直径200 μm , 玻璃厚4 μm , DT燃料充气压力10 atm.

实验结果显示, 黑腔辐射温度达到130 eV, 间接驱动DT中子产额达到 4.5×10^3 (作为对比, 烧蚀型内爆: 直接驱动DT中子产额达到 6×10^4 , 混合驱动DT中子产额达到 3×10^5).

文献[19]研究了均匀混合对中子数的影响, 假设混合区宽度满足自相似关系 $\sim Agt^2$, 其中 A 是界面的Atwood数, g 是加速度, t 是扰动增长时间. 用CFJ三温程序, 在考虑混合情况下, 一维产额有不到一个量级的降低, 从8次方降低到7次方量级, 仍比实验高两个量级.

3 SG-II 和SG-III原型

SG-II和SG-III原型都是8路三倍频激光装置, 分别于2000年和2007年建成. 激光排布都是 45° 入射, 但与SG-II不同, SG-III原型上下四路错 45° . SG-II能够输出260 J/束(1 ns, 方波), 焦斑150 μm , 离焦注腔, 2011年后采用连续相位板(CPP)束匀滑(直径400 μm). SG-III原型能够输出1 kJ/束(1 ns, 方波), 焦斑300 μm , 离焦注腔, 2012年开始采用CPP束匀滑(直径500 μm). 采用束匀滑以后能降低散射光份额, 从而提升实验数据的重复性.

这一时期, 我国ICF研究正式转入三倍频驱动, SG-II和SG-III原型黑腔峰值辐射温度分别达到160和220 eV^[19,20]. 经过SG-II一轮基频直接驱动DT内爆实验、SG-II和SG-III原型各两轮三倍频间接驱动DT内爆实验, 清楚认识到内爆出中子的两个阶段: 冲击压缩和惯性压缩, 这两个阶段对中子产额贡献相对大小的变化规律, 以及这两个阶段对实际打靶条件中的非一维因素影响的不同敏感程度. 作为标志性成果, SG-III原型间接驱动内爆DT中子产额达到 1×10^{10} .

除上述方波驱动的综合内爆实验以外, 还建立了若干关键物理量的实验研究方法^[21-23], 包括: 早期对称性^[24]、飞行阶段对称性^[25]、滞止阶段对称性^[26]、流体力学不稳定性、壳层内界面形貌, 以及内爆混合效应^[27]等; 掌握了分幅相机和条纹相机等高时间分辨X

射线成像设备的使用方法, 发展了球面弯晶单色成像技术^[28]、KB显微成像技术^[29]、VISAR测量技术^[30]等. 理论方面, 有能力用一维模拟去理解内爆实验结果.

3.1 SG-II基频直接驱动内爆实验

SG-II于2000年建成, 开展的首轮物理实验包括直接驱动爆推靶和烧蚀靶两种类型^[31,32]. 爆推靶直径200 μm , 玻璃壳厚1 μm , DT充气压力20 atm. 激光脉宽100 ps, 能量600–900 J, 焦斑直径50 μm , f 数等于3, 采用8路激光分别聚焦球心、球壳等不同打靶方式, 平均DT中子产额 3.5×10^9 . 烧蚀靶直径500 μm , 玻璃厚1 μm , DT充气压力5 atm. 激光脉宽800–900 ps, 平均能量3500 J, 采用离焦方式照射靶丸, 离焦量3–5倍靶丸半径, 并且向赤道移动光束, 以改善辐照均匀性, 平均DT中子产额 2.5×10^8 .

以一维三温BJ1程序为基础, 在增加了激光能量沉积模块和超热电子能量沉积模块以后, 可以用于烧蚀和爆推型内爆模拟^[33,34].

模拟烧蚀型内爆时, 以实测激光吸收效率为约束, 调节激光入射功率和限流因子, 并采用多发实验平均的激光能量、脉冲宽度、靶丸直径、壳层厚度等参数作为输入, 给出一维产额约 1×10^{10} . 模拟表明, 此种打靶条件下烧蚀型内爆具有明显的滞止特性, 理论中子产额主要通过惯性压缩产生. 考虑到惯性压缩特别容易受流体力学不稳定性及内爆对称性的影响, 并且上述两个影响因素实际上也存在, 于是将减速开始以后的中子产额截断, 理论预计中子产额修正为 8.7×10^8 , 大约是实验平均中子数的3.4倍.

模拟爆推型内爆时, 这样考虑超热电子的能量沉积: 认为超热电子在临界面产生, 其份额与达到临界面的激光功率密度相关; 超热电子在靶丸内输运沉积能量; 由于临界面附近自身电场对超热电子输运的抑制作用, 超热电子的剩余能量沉积在输运路径上的临界面附近. 按照上述方法, 模拟给出的YOC在50%以上, 内爆速度、收缩比、内爆时间等也与实验符合较好.

3.2 SG-II和SG-III原型间接驱动内爆实验

虽然爆推型内爆可以获得较高中子产额, 但是定标到点火时需要很高激光能量, 所以SG-II首轮实验之后, 不再以爆推靶内爆为研究重点.

相比于SG-I间接驱动内爆实验, SG-II和SG-III原型上的间接驱动内爆实验, 由于采用三倍频, X射线转化效率更高, 可以获得更高辐射温度; 黑腔辐射场更干净, 能有效减少靶丸预热, 获得更高的壳层压缩度和热斑压力; 由于激光路数更多, 驱动对称性更好; 靶结构上也更加简单, 取消了黑腔中的转换体. 上述变化, 反映到中子产额上, SG-II间接驱动烧蚀型内爆中子产额超过 1×10^8 , SG-III原型间接驱动烧蚀型内爆中子产额超过 1×10^{10} , 并且开始显现惯性压缩对实际出中子的作用, 实现了以冲击压缩为主的近一维内爆(YOC达到了70%), 相对SG-I装置内爆性能有显著提升.

SG-II和SG-III原型上分别开展了2轮DT内爆实验, 所采用的激光、黑腔和靶丸参数如表1所示. 实验中主要改变气压和烧蚀层厚度, 研究内爆性能的变化规律.

SG-II第一轮实验(2002)采用低气压(10 atm)靶, 变烧蚀层厚度(3–30 μm), 中子产额随烧蚀层厚度增加而降低, 从最高的 1.1×10^8 (3 μm)下降到 1.4×10^6 (30 μm). 相同标称初始条件下, 发次间中子产额有数倍差异. 为减弱驱动对称性对内爆性能的影响, SG-II第二轮实验采高气压(80–150 atm)靶, 烧蚀层固定厚度10 μm , 平均中子产额从 4.2×10^7 (80 atm)降低到 2.1×10^7 (150 atm). 相同标称初始条件下, 发次间中子产额的差异小于30%.

SG-III原型第一轮实验(2009)^[35]采用低气压靶(10 atm), 变烧蚀层厚度(11–21 μm), 中子产额相对变化较小, 在 1×10^{10} 附近.

为在SG-III原型上实现以惯性压缩为主的小收缩比内爆, 第二轮实验(2012)采用高压靶(80–120 atm), 变烧蚀层厚度(11–28 μm), 平均中子产额从 3.4×10^9

(11 μm), 下降到 8.3×10^8 . 相同标称初始条件下, 发次间中子产额的差异约15.5%(11 μm).

为理解上述实验结果, 采用输运建模、一维辐射流体模拟程序RDMG进行数值模拟研究. 靶丸参数和辐射温度波形采用实测值, SG-II峰值取160 eV, Planck谱, SG-III原型取220 eV, non-Planck谱. 图2展示了变烧蚀层厚度情况下YOC的变化规律. 图3展示了烧蚀层不变的情况下, 改变充气压力时YOC的变化规律. 理论上, SG-II和2009年原型内爆中子产额以惯性压缩为主, 2012年SG-III原型内爆中子产额从以冲击压缩为主过渡到以惯性压缩为主. 实际上, 理论预计以惯性压缩为主的内爆YOC都比较低(20%以下), 理论预计以冲击压缩为主的内爆YOC较高(接近70%). 并且, 所有测量中子产额都达到或超过理论预计冲击压缩的贡献, 即惯性压缩对中子的产生开始显现出效果.

作为对实验结果的细致理解, 文献[36]对比了平衡、非平衡辐射对内爆性能的影响. 非平衡辐射导致烧蚀速率降低, 对壳层和燃料预热更严重(与M带辐射自由程和壳层厚度的相对大小有关), 从而影响壳层和燃料气体的压缩, 使热斑的密度和压力降低, 中子产额降低. 该工作表明了实验上测量黑腔能谱的重要意义: 黑腔能谱对正确评估实验结果、开展防预热设计、实现低熵压缩而言非常必要. 文献[37,38]研究了驱动对称性对内爆性能的影响. SG-II现有驱动不对称性(根据芯部自发光图像推断, 收缩比约10)可以导致中子产额30%的降低.

3.3 SG-III原型直接驱动内爆冷冻分层靶实验

在惯性约束聚变点火靶设计中, 需要采用分层冷

表 1 SG-II和SG-III原型DT内爆实验靶参数

Table 1 Target parameters used in DT implosion experiments on SG-II and SG-III prototype

	2002 SGII	2005 SGII	2010 SG-III原型	2012 SG-III原型
激光能量 (J)	993–2431	2100–2600	2400–7800	5700–7500
黑腔长度 (μm)	1350	1350	1700	1700
黑腔直径 (μm)	800	800	1000	1000
激光注入孔直径 (μm)	380	380	650	650
靶丸内直径 (μm)	200	200	380	250
CH烧蚀层厚度 (μm)	5–31	10	11–21	11–28
SiO ₂ (μm)	2	2	2	2
DT压力 (atm)	8–12	80–150	9–15	80–130

图 2 (网络版彩图)SG-II和SG-III原型DT内爆实验YOC

Figure 2 (Color online) YOC of the DT implosion experiments on SG-II and SG-III prototype.

图 3 (网络版彩图)SG-II高压靶DT内爆实验YOC

Figure 3 (Color online) YOC of the DT implosion experiments on SG-II with varied filling pressure.

冻靶来提高压缩面密度. 目前国际上ICF点火实验均采用内爆冷冻靶的方式. 然而内爆分层冷冻靶实验一个复杂的科学工程, 包含物理、制靶、诊断、驱动等各方面科学技术难题. 从历史上看, 只有美国和日本开展过内爆冷冻靶实验. 日本仅仅进行了直接驱动内爆冷冻液氘靶实验^[39], 后续未见内爆冷冻分层靶的实验报道, 而冷冻分层靶才是点火所需靶型, 因涉及温度场控制、燃料定量注入以及冰层匀化与表征等技术难点, 其制备难度比液氘靶更大. 美国从20世纪70年代开始研制球形冷冻分层靶^[40], 到2000年后首次在Omega-60束激光装置上开展了直接驱动内爆冷冻分层靶实验^[41]. 首次间接驱动内爆冷冻分层靶实验则一直到国家点火装置(NIF)建成以后^[42].

SG-III原型直接驱动内爆冷冻分层靶结构如图4所示. 有以下几个方面的特点: (1) 日本、Omega直接驱动内爆冷冻靶实验采用高压渗透方式制备冷冻靶, 而原型实验用充气管注入燃料, 这也是目前NIF上

图 4 (网络版彩图)直接驱动球形冷冻靶结构示意图

Figure 4 (Color online) Schematic of cryogenic target assembly for directly driven implosion experiments.

点火靶的制备方式, 相比于高压渗透法, 打孔充法不涉及高压易爆气体, 所需的燃料量更少, 特别是对有放射性的氚靶而言; (2) 在靶丸支撑方式上, 日本、Omega直接驱动内爆靶采用若干根细丝支撑, 而原型实验冷冻靶采用充气管支撑, 已有的研究表明^[43], 充气管对内爆性能的影响比细丝更小, 是一种更好的支撑方式; (3) 与日本、Omega直接驱动内爆冷冻靶实验不同, 我们的实验中没有屏蔽罩张开过程, 整个靶组件暴露在真空靶室中, 打靶时刻激光路径上存在mm尺度的低密度He气和封口膜. 这类似于NIF上的间接驱动实验, 激光在达到黑腔壁之前, 要穿过黑腔封口膜和填充气体.

实验中遇到的主要困难是打靶精度问题和封口膜结霜^[44,45]. 打靶精度问题主要是指打靶时刻冷冻靶位置偏离靶室中心, 即激光瞄准的位置, 导致激光利用效率降低. 封口膜结霜是因为靶室内残留气体会冷凝在封口膜上, 导致较多激光能量消耗在烧蚀封口膜上, 降低了激光到靶点的能量传输效率. 这两个问题是通过针孔相机X射线图像、背反份额、内爆bangtime时间与中子产额进行关联分析进行确认的. 这两个问题导致首轮直接驱动内爆冷冻靶实验中中子产额最高只有 $\sim 2 \times 10^6$, 比常温靶内爆中子产额低一个量级以上.

打靶精度问题和封口膜结霜在常温靶内爆实验中不存在, 是低温条件带来的新问题, 以前没有应对经验. 另一方面, 早期Omega直接驱动内爆冷冻靶实验同样遇到打靶精度问题, NIF早期内爆冷冻靶实验也同样遇到封口膜结霜问题. Omega直接驱动内爆冷冻靶实验中打靶精度问题是由于冷冻蓝宝石视窗的视差所导致, 即常温情况下蓝宝石视窗的视差与冷冻条件

下有显著差异, 通常会导致60–120 μm 的偏差, 采用静态修正瞄靶位置, 可以解决这一问题; NIF早期内爆冷冻靶实验发现: 即使在冷冻屏蔽罩闭合的情况下, 黑腔封口膜上仍然会结霜, 随后采取“暴风窗”的方法解决了这一问题.

实验中, 用靶场瞄靶传感器长时间监测靶丸位置变化情况, 在冷冻开始2 h之后的70 min内移动了240 μm . 移动的方向一致向北, 即冷冻臂的方向. 据此判断由于冷冻臂收缩导致打靶时刻冷冻靶偏离靶室中心. 解决这一问题的方法是通过优化打靶流程, 将从传感器收回到打靶的时间间隔从开始的30 min以上缩小到10 min以内, 冷冻靶中心偏离靶室中心的距离从最初的~150 μm 减少到~30 μm , 如图5所示.

为避免损失激光能量, 通常利用预脉冲烧蚀结霜封口膜, 使之稀疏到激光临界密度以下, 再用主脉冲驱动靶丸内爆. 但是预脉冲长度需要仔细考虑, 太长和太短都会降低内爆性能. 如果预脉冲太短, 主激光能量会损失在封口膜上; 如果预脉冲太长, 预脉冲会使靶丸提前内爆, 降低主脉冲利用效率. 预脉冲长度由结霜情况决定, 而结霜情况(厚度、成分)与具体的靶场环境、靶构型相关, 需要对神光III原型实验条件下的结霜情况有定量认识.

为确定预脉冲长度, 设计了低温分解实验, 在一次中用4种预脉冲长度(0.6, 0.8, 1.1, 1.5 ns)烧蚀封口膜, 通过观察封口膜后靶点位置处Au片的发光情况, 判断能够使激光能量传输到Au片上所需的预脉冲长度. 实验结果表明^[46], 预脉冲长度1–1.5 ns较优(远大于初始预计的0.3 ns). 预脉冲具体数值还要参考封口膜洁净程度: 当封口膜较洁净时, 预脉冲长度取1 ns; 当封口膜吸附物较多时, 预脉冲长度取1.5 ns. 采用优化预脉冲长度, 中子产额提升超过一个量级, 达到 2.8×10^7 .

4 SG-III主机

神光III主机于2015年全部建成^[12], 同年开展了方波脉冲驱动的小收缩比内爆实验, 由于双环注入带来的对称性改善, 以及环向对称性的提升, 首次实现以惯性压缩为主、达到中等收缩比的近一维内爆, DT中子产额超过 1×10^{12} , YOC超过50%(如图6所示), 取得了我国间接驱动内爆实验里程碑式的进展.

在此基础上, 内爆实验向更低熵增、更高收缩比

图5 (网络版彩图)直接驱动内爆冷冻靶打靶精度不断提高
Figure 5 (Color online) Improvement of shot accuracy in the directly driven cryogenic layered target implosion experiments.

图6 (网络版彩图)2015年主机全束组内爆实验YOC与历年实验结果对比
Figure 6 (Color online) Comparing YOC achieved in 2015 on SG-III laser facility with that achieved previously on SG-III prototype and SG-II.

的点火参数区间迈进, 于2016年开展了整形脉冲中等收缩比内爆实验. 初步实验结果显示流体力学不稳定性对内爆性能的影响超出预期, 导致实验YOC只有0.1%水平. 目前, 一方面开展分解实验, 确证导致YOC显著降低的原因; 另一方面, 开展关键技术攻关, 提升实验控制水平. 预计能在2018年前后实现低熵、中等收缩比、近一维内爆.

这一时期, 诊断上, 成功研制了通用搭载平台, 以及气室型条纹相机和分幅相机, 能够做到同一发次对多物理量进行同时测量, 包括: 黑腔能量学相关, 以及内爆时间、离子温度、核反应速率、中子产额等物理量, 以及同一轮实验对不同阶段对称性, 以及内爆速度进行同时测量; 制靶上, 能够做到对靶丸球形度、表面粗糙度、壳层厚度均匀性、充气压力等参数进行表征, 正对靶丸壳层各位置孤立缺陷进行控制; 数值模拟方面, 能够用二维集成程序LARED-JC给出黑腔辐射

场, 用一维输运程序RDMG结合实测靶参数理解内爆实验结果, 用二维欧拉程序LARED-S评估二维因素对内爆性能的影响.

5 总结

经过三十多年的发展, 从SG-I到SG-III主机, 从2路1.4 kJ基频驱动到48路180 kJ三倍频双环驱动, 从早期单一、综合物理量测量到如今分阶段、分过程、多物理量同时诊断, 内爆物理实验研究在深度和广度上都有很大进步, 内爆性能稳步提升, 越来越接近点火参数区间.

但是也应该看到, 越接近点火参数区间, 内爆性能对若干非理想因素影响的敏感程度越高, 对实验条件控制的要求也越严苛, 定量理解实验结果也越困难. 面对此种情况, 一方面可以发展二维、三维程序, 包含已知的所有物理过程的建模, 通过理论和实验的对比, 判断主要影响因素, 及其影响程度; 另一方面, 开展分解实验研究, 确证上述判断的正确性, 以及改进措施的有效性, 努力使实验结果回归一维. 只有在此基础上进行的外推才具有相当的置信度.

在努力提高自身内爆实验能力的同时, 也应关注美国ICF研究成果, 开展针对性研究. 比如流体力学不稳定性, 很早就认识到这一问题, 采取的策略是: 靶设

计上对表面光洁度提出要求, 使扰动增长处于线性和弱非线性阶段. 这样将问题简化为实验验证扰动增长因子预测的准确性, 为此在Nova和Omega上开展了许多扰动增长因子测量实验, 使作者有将流体力学不稳定性增长与内爆混合同等的错觉. 然而NIF的实验表明, 虽然扰动增长因子可以预测很准确, 但是实际内爆混合的影响却大于预期. 这一事实启示我们思考三个问题: (1) 混合的来源是否仅仅是非稳定性增长? 内界面减速RT只在界面附近形成混合层, 而实验上观测到混入热斑中心区域的壳层物质; (2) 非稳定性增长来源是否仅仅是表面粗糙度? 已经发现物质含量不均匀导致的密度扰动也会对非稳定性发展有贡献; (3) 如何从非稳定性发展到混合? 不同界面、不同阶段、不同程度的流体力学不稳定性发展如何影响最终内爆性能, 它们是在什么时候开始起作用, 具体是减少热斑干净体积呢, 还是减少压缩做功. 再比如滞止阶段内爆动力学, 由于条件极端、状态变化剧烈, 以前实验上几乎没有观测和控制, 理论上是以经典模型为基础的一维理解, 然而NIF实验结果表明热斑压力比预期低一倍左右. 这一事实告诉我们, 实验上需要发展更高时间、空间分辨的诊断技术, 观测减速阶段壳层形状、状态的演化过程, 理论上考虑现有模型在如此极端条件下的适用性.

致谢 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心诊断、制靶和驱动器相关的同志. 感谢应用物理与计算数学研究所相关同志的帮助和指导. 感谢审稿人提出的许多建议.

参考文献

- 1 Peng H S. ICF and related laser programs in China. In: Proceedings of the Laser Optics '93 the International Society for Optics and Photonics. St. Petersburg, 1993
- 2 Peng H S. Inertial confinement fusion program at CAEP. In: Proceedings of the 12th International Conference on Laser Interaction and Related Plasma Phenomena. Osaka, 1995
- 3 Peng H S. Progress in the CAEP ICF program. In: Proceedings of the 13th International Conference on Laser Interactions and Related Plasma Phenomena. Chengdu, 1997
- 4 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
- 5 Zheng Z J, Guo Q, Cheng J X, et al. Implosion performance of laser driven exploding pusher targets (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 1989, 1: 139–144 [郑志坚, 郭秦, 成金秀, 等. 激光驱动爆推靶特性研究. *强激光与粒子束*, 1989, 1: 139–144]
- 6 Zheng Z J, Tang D Y, Xie P. First indirectly driven implosion experiments in China (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 1991, 2: 146, 148 [郑志坚, 唐道源, 谢平. 我国首次间接驱动内爆出中子实验成功. *强激光与粒子束*, 1991, 2: 146, 148]

- 7 Ding Y N. Current state of experimental study of laser fusion in China (in Chinese). *Trends in Nucl Phys*, 1995, 12: 21–26 [丁耀南. 我国激光核聚变实验研究概述. *核物理动态*, 1995, 12: 21–26]
- 8 Lin Z Q, Wang S J, Fang D Y, et al. Successful operation of 8 beam SG-II laser facility for both $1\omega_0$ and $3\omega_0$ output. *High Power Laser Part Beams*, 2002, 3: 403–407
- 9 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]
- 10 Wu J F, Miao W Y, Wang L F, et al. Indirect-drive ablative Rayleigh-Taylor growth experiments on the Shenguang-II laser facility. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 042707
- 11 Zheng Z J, Ding Y K, Ding Y N, et al. Recent progress and application of diagnostic technique in laser fusion (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2003, 15: 1073–1078 [郑志坚, 丁永坤, 丁耀南, 等. 激光惯性约束聚变综合诊断系统. *强激光与粒子束*, 2003, 15: 1073–1078]
- 12 Zheng W G, Wei X F, Zhu Q H, et al. SG-III laser facility has successfully achieved 60 TW/180 kJ ultraviolet laser (351 nm) output (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2016, 28: 019901 [郑万国, 魏晓峰, 朱启华, 等. 神光-III主机装置成功实现60 TW/180 kJ三倍频输出. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 019901]
- 13 Lindl J, Landen O, Edwards J, et al. Review of the national ignition campaign 2009–2012. *Phys Plasmas*, 2009, 21: 020501
- 14 2015 Review of the Inertial Confinement Fusion and High Energy Density Science Portfolio. Review Report, National Nuclear Security Administration, Department of Energy, 2016
- 15 Park H S, Hurricane O A, Callahan D A, et al. High-adiabat high-foot inertial confinement fusion implosion experiments on the national ignition facility. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 055001
- 16 Zheng Z J, Xie P, Sun K X, et al. Elementary explorations for hohlraum physics (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 1993, 5: 575–580 [郑志坚, 谢平, 孙可熙, 等. 黑腔物理实验的定标规律. *强激光与粒子束*, 1993, 5: 575–580]
- 17 Ding Y K, Zheng Z J, Tang D Y, et al. 0.53 μm laser-plasma interaction (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 1996, 5: 215–220 [丁永坤, 郑志坚, 唐道源, 等. 0.53 μm 激光与等离子体相互作用实验研究. *强激光与粒子束*, 1996, 5: 215–220]
- 18 Zhang J, Jiang R H, Zeng X C, et al. A theoretical model of exploding pusher targets (in Chinese). *Nucl Fusion Plasma Phys*, 1988, 8: 207–211 [张均, 姜荣洪, 曾先才, 等. 爆炸推进层靶的理论模型. *核聚变与等离子体物理*, 1988, 8: 207–211]
- 19 Jiang R H, Li Y S, Ding S R, et al. “Mixing” influence on radiation driven implosion (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 1996, 8: 221–226 [姜荣洪, 李云生, 丁生荣, 等. “混合”对辐射驱动内爆的影响. *强激光与粒子束*, 1996, 8: 221–226]
- 20 Li S W, Yi R Q, Jiang X H et al. Experimental study of radiation temperature for gold hohlraum heated with 1 ns, 0.35 μm lasers on SG-III prototype laser facility (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2009, 58: 3255 [李三伟, 易荣清, 蒋小华, 等. 神光III原型1 ns激光驱动黑腔辐射温度实验研究. *物理学报*, 2009, 58: 3255]
- 21 Ding Y K, Jiang S E, Liu S Y, et al. Recent progress on physical experiment and target diagnostics in Research Center of Laser Fusion (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2013, 25: 3077–3081 [丁永坤, 江少恩, 刘慎业, 等. 激光聚变研究中心聚变靶物理实验和诊断技术研究进展. *强激光与粒子束*, 2013, 25: 3077–3081]
- 22 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]
- 23 Pu Y D, Chen B L, Huang T X, et al. Experimental studies of implosion physics in the research of indirect-drive inertial confinement fusion (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2015, 27: 032015 [蒲昱东, 陈伯伦, 黄天晖, 等. 激光间接驱动惯性约束聚变内爆物理实验研究. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 032015]
- 24 Chen B L, Jiang W, Jing L F, et al. Reemission technique for early time, hohlraum radiation symmetry measurements on SG II facility (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2013, 25: 385–388 [陈伯伦, 蒋炜, 景龙飞, 等. 再发射技术测量SGII黑腔靶早期对称性. *强激光与粒子束*, 2013, 25: 385–388]
- 25 Liu S Y, Yang G H, Zhang J Y, et al. Experimental research of capsule implosion by X-ray backlighting radiography at Shenguang II (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2011, 23: 3333–3337 [刘慎业, 杨国洪, 张继彦, 等. 神光II装置靶丸内爆过程X射线背光照相实验研究. *强激光与粒子束*, 2011, 23: 3333–3337]
- 26 Li H, Pu Y D, Jing L F, et al. Variation of implosion asymmetry with hohlraum length and time in indirect-drive inertial confinement fusion (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 225204 [黎航, 蒲昱东, 景龙飞, 等. 间接驱动的内爆不对称性随腔长和时间变化的研究. *物理学报*, 2013,

- 62: 225204]
- 27 Pu Y, Huang T, Wei M, et al. Spectroscopic studies of shell mix in directly driven implosion on SGIII prototype laser facility. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 122707
- 28 Chen B, Yang Z, Wei M, et al. Implosion dynamics measurements by monochromatic X-ray radiography in inertial confinement fusion. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 122705
- 29 Cao Z R, Ding Y K, Dong J J, et al. Researches and applications of X-ray high-spatial-resolution multi-energy microscope system (in Chinese). *High Power and Particle Beams*, 2015, 27: 100–114 [曹柱荣, 丁永坤, 董建军, 等. X射线高空间分辨多色显微成像系统研制及应用. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 100–114]
- 30 Wang F, Peng X, Liu S, et al. A line-imaging velocity interferometer technique for shock diagnostics without X-ray preheat limitation. *Rev Sci Instruments*, 2011, 82: 103108
- 31 Peng H S, Zheng Z J, Zhang B H, et al. Direct-drive implosion experiments on the SG-II laser facility. *J Fusion Energy*, 2000, 19: 81–85
- 32 Cheng J X, Zhen Z J, Chen H S, et al. Implosion compression characteristic of direct-driven ablation target with 1.06 μm laser (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2004, 53: 3419–3423 [成金秀, 郑志坚, 陈红素, 等. 1.06 μm 激光直接驱动烧蚀靶内爆压缩特性. *物理学报*, 2004, 53: 3419–3423]
- 33 Luo P Q, Zhang Y H, Zhang W Y, et al. Theoretical study of directly driven ablation on SGII using $1\omega_0$ laser (in Chinese). *Annu Rep ICF Prog China (1999–2000)*, 2001, 21 [罗平庆, 张永慧, 张维岩, 等. 神光II基频激光烧蚀靶实验的理论研究. *ICF年报汇编1999–2000*, 2001, 21]
- 34 Luo P Q, Yu R, Zhang Y H, et al. Theoretical study of exploding pusher implosion on SGII using $1\omega_0$ laser (in Chinese). *Annu Rep ICF Prog China (1999–2000)*, 2001, 29 [罗平庆, 于仁, 张永慧, 等. 神光II基频爆推靶实验的理论研究. *ICF年报汇编1999–2000*, 2001, 29]
- 35 Pu Y D, Kang D G, Huang T X, et al. Experimental studies of low-convergence-ratio implosions (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2014, 63: 125211 [蒲昱东, 康洞国, 黄天珣, 等. 小收缩比内爆实验初步研究. *物理学报*, 2014, 63: 125211]
- 36 Sheng J T, Miao W Y, Li Y S, et al. Influence of non-LTE radiation ablation on imploding neutron yield (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2005, 3: 386–390 [盛家田, 缪文勇, 李运生, 等. 非平衡辐射烧蚀对内爆中子产额的影响. *强激光与粒子束*, 2005, 3: 386–390]
- 37 Zeng X C, Miao Z G, Chen F Z, et al. Improvement of asymmetry of radiation-driven implosion on SG-II facility. *High Power Laser Part Beams*, 1998, 10: 243–248
- 38 Gao Y M, Dai Z H. Influence of radiation-driven asymmetry on capsule compression (in Chinese). *High Power Laser Part*, 2010, 22: 1021–1025 [高耀明, 戴自焕. 辐射驱动不对称性对靶球压缩的影响. *强激光与粒子束*, 2010, 22: 1021–1025]
- 39 Tanaka K A, Yamanaka T, Nishihara K, et al. Cryogenic deuterium target experiments with the GEKKO XII, green laser system. *Phys Plasmas*, 1995, 2: 2495–2503
- 40 Henderson T M, Johnson R R. The implosion of cryogenic spherical shell targets. *Appl Phys Lett*, 1997, 31: 18–20
- 41 Stoeckl C, Chiritescu C, Delettrez J A, et al. First results from cryogenic target implosions on OMEGA. *Phys Plasmas*, 2002, 9: 2195–2201
- 42 Glenzer S H, Callahan D A, MacKinnon A J, et al. Cryogenic thermonuclear fuel implosions on the National Ignition Facility. *Phys Plasmas*, 2012, 19: 056318
- 43 Igumenshchev I V, Marshall F J, Marozas J A, et al. The effects of target mounts in direct-drive implosions on OMEGA. *Phys Plasmas*, 2009, 16: 082701
- 44 Pu Y D, Huang T X, Li H, et al. Direct drive implosion experiments on SGIII prototype laser facility: Assessing energy coupling efficiency and implosion symmetry. *Phys Plasmas*, 2012, 19: 072708
- 45 Pu Y D, Huang T X, Li P, et al. Preliminary results from direct-drive cryogenic target implosion experiments on SGIII prototype laser facility. *Phys Plasmas*, 2014, 21: 012703
- 46 Pu Y, Huang T, Lei H, et al. Direct-drive cryogenic-target implosion experiments on SGIII prototype laser facility. *Phys Plasmas*, 2015, 22: 042704

Progress of indirectly driven implosion experiments

PU YuDong¹, HUANG TianXuan^{1*}, MIAO WenYong¹, KANG DongGuo²,
GAO YaoMing², ZOU ShiYang², GE FengJun², CHEN BoLun¹, JIANG Wei¹, YU Bo¹,
YAN Ji¹, ZHANG Xing¹, CHEN ZhongJing¹, CHEN JiaBin¹, TANG Qi¹, SONG ZiFeng¹,
LIU ShenYe¹, JIANG ShaoEn¹ & 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*

Achieving ignition via inertial confinement approach is of strong application value and important science significance. It is also a project of large scale that depends on the national strength. Involving theory, target fabrication, diagnostics, and laser facilities, integrated implosion experiment plays an important role in the research of ICF. Since the first successful neutron production with directly driven implosion in the 80's, the quasi one-dimensional implosion performance dominated by shock compression was demonstrated in the period of 1990–2010, and the quasi one-dimensional implosion performance dominated by inertial compression was achieved in recent years. All of these facts definitely show the progress on improving the performance of integrated implosion. With the completion of SG-III laser facility, and in the situation of facing frustration in the US ignition program, there is grand opportunity and challenge when we are exploring toward the ignition parameter space with higher convergence ratio and lower adiabat.

inertial confinement fusion, implosion experiments, SG laser facility

PACS: 52.57.Az, 52.57.Fg

doi: [10.1360/SSPMA2018-00011](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00011)