

# 神光系列装置激光聚变实验与诊断技术研究进展<sup>\*</sup>

江少恩<sup>†</sup> 丁永坤 刘慎业 张保汉 郑志坚 杨家敏

缪文勇 黄天暄 张继彦 李三伟 曹磊峰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 621900)

**摘要** 文章主要介绍了国内自 2000 年以来的激光惯性约束聚变(ICF)实验研究以及诊断技术研究的进展,主要内容为神光 II 激光装置上的实验,也对刚建成不久的神光 III 原型装置上的实验作简要介绍,此外,文章还介绍了神光 II 和神光 III 原型装置上近期发展的诊断技术和设备,文章作者在神光 II 激光装置上开展了多项的物理实验研究,其中包括黑腔物理、内爆物理、流体动力学不稳定性、辐射不透明度以及辐射驱动冲击波等,并取得了重要的进展,在 X 射线单能成像、Thomson 探针、无高级衍射的单级衍射光栅等新型关键诊断技术与尖端设备研制方面也取得了显著进展。

**关键词** 激光聚变,神光 II 激光装置,神光 III 原型装置,惯性约束聚变,诊断技术

## Recent inertial confinement fusion experiments and diagnostic techniques on the shenguang laser facility

JIANG Shao-En<sup>†</sup> DING Yong-Kun LIU Shen-Ye ZHANG Bao-Han

ZHENG Zhi-Jian YANG Jia-Min MIAO Wen-Yong HUANG Tian-Xuan

ZHANG Ji-Yan LI San-Wei CAO Lei-Feng

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** The experiments and diagnostic techniques for inertial confinement fusion (ICF) on the Shenguang laser facility since 2000 are reviewed. Many experiments were conducted on the Shenguang II (SG-II) and Shenguang III prototype (SG-IIIYX) laser facilities. The SG-IIIYX was completed in 2006. The experiments on SG-II included several physics experiments on topics such as hohlraum physics, implosion physics, fluid dynamical instability, opacity, and shocks driven by radiation. The experimental results indicated that significant achievements were acquired on SG-II. The ICF experiments were conducted on SG-IIIYX after it was finished. The first experiment, which included Hohlraum and implosion physics, was performed in 2007. The integrated diagnostic systems for SG-II and SG-IIIYX have been built, as well as the X-ray monochromatic imaging instrument, Thomson probe, transmission grating without higher order diffraction, and so forth. These characteristic diagnostic techniques are important for improved measurement accuracy.

**Keywords** laser fusion, Shenguang II laser facility, Shenguang III prototype laser facility, inertial confinement fusion (ICF), diagnostic technique

## 1 引言

在地球上实现受控热核聚变反应,将可能为人类提供丰富、经济、安全的能源<sup>[1]</sup>。惯性约束聚变(ICF)是实现受控热核聚变很有希望的途径之

一<sup>[2]</sup>。ICF 领域研究工作的开展无论是对国民经济、军事应用,还是对基础研究探索都有着重要而特殊

<sup>\*</sup> 国家高技术研究发展计划、国家自然科学基金(批准号:10775120)资助项目

2009-11-26 收到

<sup>†</sup> 通讯联系人, Email: jiangshn@vip.sina.com

的意义. 目前的核电站所产生的能量来自核裂变反应. 这种核裂变反应所提供的能量在下个世纪的生活中将会变得越来越重要. 但是, 这种核电站的安全性、对环境的污染以及核废料的处理等问题确实令人大伤脑筋. 由于受控核聚变是干净、安全、经济的能源, 所以人们将新的能源主要寄希望于核聚变反应上. 氢弹爆炸所释放的威力巨大的能量就来自爆炸时的核聚变反应. 然而, 氢弹的爆炸是大规模的核能释放, 无法人工控制. 在地球上实现受控核聚变反应是半个多世纪以来科学家们努力追求的目标.

实现可控热核聚变点火(或科学上的得失相当), 必须要满足劳逊判据<sup>[3]</sup>:  $n\tau \geq 10^{14}$  (s/cm<sup>3</sup>), 其中  $n$  为单位体积燃料核子数,  $\tau$  为燃料等离子体约束时间, 对应的燃料温度约为 10keV. 从上面劳逊判据可以看到, 实现热核聚变的点火有两种途径: 一种是延长箍缩时间; 另一种是提高热核燃料的密度. 第一种途径是磁约束受控核聚变(magnetic confinement fusion, MCF)研究, 它试图将热核燃料氘加热到高温, 并设法延长高温的维持时间以达到点火条件.

与磁约束聚变不同, 惯性约束聚变采用第二种途径力争实现点火. 惯性约束的含义就是: 在极高的燃料密度( $n$ )状态下产生聚变反应, 利用物质密度惯性维持所需燃烧时间( $\tau$ ), 当燃料飞散前, 热核燃料  $n\tau$  值已经达到劳逊判据. 在 ICF 研究中, 劳逊判据通常写为被压缩靶丸密度  $\rho$  和半径  $R$  的简单关系:  $\rho R > 0.3$  (g/cm<sup>2</sup>)<sup>[4,5]</sup>.

惯性约束方法实现热核点火的重要特点是: 需要高功率密度的能源来加热燃料靶丸, 使其高度的压缩而达到热核火点的条件即劳逊判据. 目前主要是利用高功率激光、离子束来探索惯性约束受控核聚变的可能性, 但研究进展最快的还是激光聚变. 激光驱动惯性约束聚变(ICF)研究, 是将激光或由激光转换成的 X 射线辐射与球形靶丸相互作用, 使靶丸内的 DT 燃料压缩到高温高密度以达到点火燃烧.

利用激光产生驱动惯性约束聚变内爆需要的能流和压强可采用两种途径获得(见图 1). 在直接驱动中, 多束激光束直接均匀地辐照含有热核燃料的聚变靶丸, 激光能量被靶丸外层低密度的冕区中的电子吸收, 电子热传导将能量输运到靶壳的高密度区, 驱动烧蚀并产生内爆. 在间接驱动中, 激光能量被围绕靶丸的黑腔壁高 Z 物质吸收, 并部分转换成 X 射线能量, 被约束在黑腔内, 然后 X 射线被燃料的靶丸吸收, 产生烧蚀压力, 驱动内爆. 间接驱

动的优点在于: 可以降低激光束均匀性和流体力学不稳定性的要求. 国内外的激光聚变一般以间接驱动为主.

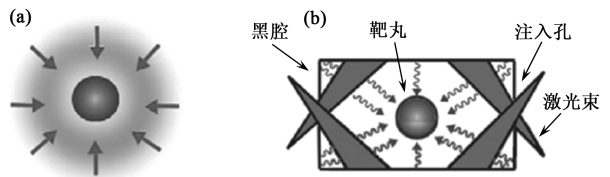


图 1 ICF 利用直接驱动(a)或间接驱动(b)产生高烧蚀压, 驱动内爆

ICF 早已成为当代重大而难度大的国际高科技研究课题, 为了演示点火和聚变燃烧, 世界各地都在进行兆焦耳激光器和拍瓦激光器的高重复率能量驱动器的运转和建造. 美国于 2009 年建成国家点火装置(NIF)<sup>[4,5]</sup>, 预计 2010 年开始进行点火实验. 法国正在加紧建造兆焦耳激光装置(LMJ)<sup>[6]</sup>.

神光 II 和神光 III 原型装置为我国 2000 年以来激光聚变实验研究的主要装置, 本文将主要介绍这两套装置的实验进展与诊断技术发展概况. 为了对受控核聚变有所了解, 对磁约束核聚变的进展作简要介绍, 同时为了对激光聚变研究有更全面的认识, 对国外实验研究也作简要介绍.

## 2 磁约束核聚变进展

国际磁约束核聚变研究始于 1950 年代, 经历了从最初的少数几个核大国进行秘密研究阶段, 到 1950 年代末的技术解密, 再到 1960 年代后世界范围内很多国家合作参与的研究阶段. 在磁约束受控核聚变途径的探索方面, 也经历了箍缩、磁镜、仿星器等途径. 从 1980 年代开始, 主要集中于以托卡马克装置为主的研究途径上. 1980 年代以来, 国际磁约束受控核聚变研究得了显著进展, 一批大型和超大型托卡马克装置(美国的 TFTR、欧共体的 JET、日本的 JT-60U、苏联的 T-15 等)相继建成并投入运行. 多项聚变工程关键技术迅速发展, 高温等离子体的参数逐步提高, 主要物理参数已接近达到实现受控核聚变所要求的数值. 在典型的装置上, 聚变燃料已可加热到 2—4 亿度的高温, 表征聚变反应率最重参数(聚变三乘积)已达到  $1.5 \times 10^{21}$  keV/m<sup>3</sup>s, 人类已经看到了实现聚变能源的曙光. 进入 1990 年代, 国际受控核聚变研究取得了破性的进展. 1991 年末, 人类首次用可控的方法在欧洲共同体 JET 装置上进行了首次氘—氘放电实验, 获得聚变能达到 3.4MJ, 聚变功率

达到 1.7MW. 随后, 在美国普林斯顿大学的 TFTR 装置上的氘-氘放电也获得成功, 其输出的功率更高, 达到了 10.7MW, 获得聚变能 6.5MJ. 1997 年 JET 装置创下了输出聚变功率 16.1MW、聚变能 21.7MJ 的世界纪录. 1998 年, 在日本原子能研究所的 JT-60U 托卡马克装置上进行的 D-D 反应的实验, 其等效的氘-氘聚变反应的能量增益因子  $Q$  (能量增益因子定义为: 聚变反应产生的能量与输入装置能量之比) 已达到 1.25. 这些突破性进展宣告了以托卡马克为代表的磁约束核聚变的科学可行性在实验上已经得到了证实.

由于在托卡马克聚变研究的道路上取得了稳步的实质性进展, 1985 年, 美苏首脑在日内瓦峰会上提出建造国际热核聚变实验堆 (international thermo-nuclear experiment reactor, ITER). 此后在欧、美、日、俄四方科学家与工程师的合作努力下, 于 1998 年完成了 ITER 的工程设计 (engineering design activity, EDA), 当时的预算为 100 亿美元. 其间, 在 ITER 上进行了大量研究和发展工作, 完成了一系列原型部件模块的成功制造和实验, 论证了实验性聚变堆的工程技术可行性. 在 ITER 的长期设计过程中, 托卡马克实验不断取得进展, 原设计依据的较低的约束模式逐步被当前大中型实验装置弃用, 更好的高约束运行模式在近几年的实验中逐渐被了解和掌握, ITER 计划被要求改进设计. 改进设计的目标是 100 亿元的建造费用显得过高, 需要研究降低造价, 同时, 又能达到所需的物理要求, 解决建堆有关的关键问题. 自 1998 年夏天以来, ITER 计划开展了为期三年的 ITER 降低费用的设计研究, 称为 ITER-RC. 美国由于其国内聚变政策调整, 于 1998 年宣布退出 ITER 计划. 此后, 欧、日、俄三方仍然全力推进 ITER 的改进设计, 到 2001 年完成了基于新运行模式的工程设计及大部分部件与技术的研发工作. 新的设计称为 ITER-FEAT (Fusion Energy Advanced Tokamak), 新设计在维持 ITER 原有的主要物理与工程目标的条件下, 经费被降到约 46 亿美元, 预计的建设期为 10 年, 运行实验期为 20 年.

磁约束核聚变主要依靠强有力的磁场将低密度、高温度的等离子体约束足够长时间, 以使氘氘等离子体达到核聚变反应所需要的条件. 经过几代科学家的努力, 目前的磁约束实验装置已经分别可以将较低温度、低密度的等离子体约束足够长的时间或者在短时间内将等离子体加热, 但是如何使磁约

束实验装置中的等离子体在实现长约束时间的同时也达到核聚变反应所需要的高温, 目前仍是一个极大的难题.

### 3 国外激光聚变实验研究的主要进展

为了满足能源和核爆模拟研究的需要, 美国研制了一系列的固体激光器, 主要有 Janus、Argus、Shiva、Nova 和 Omega 等激光装置. Nova 装置共输出 10 束光, 脉宽为 1ns 时, 在多种多样的脉冲形状下, 均可三倍频 (波长等于  $0.35\mu\text{m}$ ) 输出 30—40kJ 能量.

其他国家也先后研制了大小不同的固体激光装置. 日本大阪大学的 GEKKO12 激光装置, 输出 12 束光, 脉宽 1ns 时, 三倍频输出能量可达 10kJ. 法国 Limeil 实验室的 Phebus 激光装置相当于 Nova 装置的两束. 美国先后在 Argus、Shiva 和 Nova 固体激光装置上做了一系列的靶物理实验, 其中包括激光等离子体相互作用、黑腔物理、辐射输运、内爆压缩等方面的实验, 并且在 1976—1981 年期间还研究了 Cairn 系列的单壳层靶和 Apollo 系列的双壳层靶作为高增益靶的可能性. 1979 年, 当清楚地知道在 Nova 装置上不可能实现热核点火后, 美国在 Nova 装置上进行了一系列与“流体力学上等价的靶”接近的高增益靶物理实验计划 (NTC) 和 Halite/Centurion (H/C) 地下核试验, 检验了高增益靶物理, 为点火和高增益驱动器的设计提供了依据. H/C 是 1978 年至 1988 年洛斯阿拉莫斯 (Los Alamos) 和利弗莫尔联合研究惯性约束聚变的地下核试验计划, 该计划在地下试验中用核爆炸产生的 X 射线辐照氘氘小囊, 实现了氘氘热核点火和自持燃烧的过程, 为核爆模拟研究核武器的点火燃烧过程和高增益惯性约束聚变奠定了重要的基础. 1983 年, 在 Novette 装置上进行的  $0.53\mu\text{m}$  波长、7—9kJ 能量的激光黑腔靶耦合实验, 黑腔辐射温度达到 150—180eV. 1985 年, 在 Nova 装置上进行的实验中, 黑腔辐射温度达到 200—250eV, 而且超热电子很少, 当时据此推测实现高增益需要输出能量为 5—10MJ 的驱动器. 1986—1990 年, 利弗莫尔实验室间接驱动靶物理研究取得快速进展. 1990 年初, 在 Nova 装置上, 黑腔辐射温度达到 300eV, 超热电子能量少于 1%. Nova 装置上的实验和定量的数值模拟演示了内爆对称性控制和 RT 不稳定性的发展过程, 验证了脉冲整形的好处和辐射驱动内爆的定



标规律等有关问题. 内爆速度、流体力学不稳定性和黑腔辐射温度之间的综合分析表明, 如果黑腔辐射温度能够达到 300eV, 内爆速度达到  $4 \times 10^7 \text{ cm/s}$ , 激光能量达到 1—2MJ, 就可能实现热核点火和达到中等程度的增益. 为此, 美国国家科学院 Koonin 委员会 1990 年 9 月的报告和美国能源部聚变政策顾问委员会的报告都建议建造 1—2MJ 的玻璃激光器, 争取大约在 10 年的期间内演示热核点火和中等增益的聚变反应, 条件是在 Nova 装置上成功地完成黑腔等离子体对内爆对称性的影响和黑腔等离子体集体效应(包括参量不稳定性)的各种定标定律等一系列实验. 为了完成这些实验和适应精密物理的要求, Nova 装置于 1993 年完成了精密化计划, 进一步改善了光束质量、能量平衡和瞄准精度. 1996 年已在精密 Nova 装置上成功地完成了上述实验. 迄今为止, 美国还做了许多有关物质不透明度和状态方程方面的实验, 并取得了非常有意义的结果. 由于 NIF 靶物理的复杂性, NTC 计划的完成不等于所有问题都得到解决. Nova 于 1999 年停止运行. 毕竟 Nova 的局限性, 比如只有 10 路激光难以达到好的内爆对称性, 不可能完全模拟 NIF 的条件, 所以某些问题可以在条件更好的 Omega 激光装置上进行研究. Omega 的输出能力为: 60 束、波长  $0.35 \mu\text{m}$ 、激光能量大于 30kJ, 辐照非均匀性可达到 1%.

1993 年, 美国能源部签署了建造国家点火装置(NIF)的任务并批准编写 NIF 的概念设计报告. 1997 年 6 月, NIF 正式动工建造, NIF 装置有 192 束光, 净口径为  $40\text{cm} \times 40\text{cm}$ , 脉冲形状可调, 三倍频输出时到达靶面的能量为 1.8MJ, 输出脉冲峰值功率为 500TW, 在脉冲宽度大于 2ns 的时间范围内, 光束功率平均为 8% rms, 光束瞄准精度为  $50 \mu\text{m}$ . 正式投入运行以后, 每年可以打 50 发间接驱动当量为 20MJ 的聚变靶丸.

#### 4 国内 ICF 实验研究进展

在 1963 年, 前苏联的 Basov 和我国科学家王淦昌先生在国际上分别独立提出激光驱动聚变的建议之后, 中、美、日、法、英、俄等国开始进行激光驱动 ICF 的研究, 30 多年来, ICF 研究已在世界范围内取得了重要进展. 高功率激光驱动器由于能够在实验室条件下创造高温、高压、高密度的极端条件, 能够获得比其他手段(如高能加速器等)更高的峰值功率, 因此成为开展高能密度物理研究必不可少的工

具. 为此, 我国相继建立了神光系列激光装置和星光系列激光装置, 并进行了 ICF 靶物理的研究.

近 40 年来, 我国先后在上海与四川绵阳等地建成了万兆瓦激光系统、高功率六路激光装置、星光 I、神光 I、星光 II、神光 II、神光 III 原型装置等高功率激光系列驱动器(见表 1), 为我国激光聚变研究作出了重要贡献.

表 1 我国高功率固体激光装置研究历程与现状

装置名称	地点	能量	束数	建成时间
万兆瓦激光系统	上海	50J/1 $\omega$	1	1973 年
六路激光装置	上海	30J/1 $\omega$ /束	6	1980 年
星光 I 激光装置	绵阳	30J/3 $\omega$ , 70J/1 $\omega$	1	1985 年
神光 I 激光装置	上海	1.6kJ/1 $\omega$	2	1986 年
星光 II 激光装置	绵阳	130J/3 $\omega$ , 250J/1 $\omega$	1	1993 年
神光 II 激光装置	上海	3kJ/3 $\omega$ , 6kJ/1 $\omega$	8	2000 年
星光 III 原型装置	绵阳	10kJ/3 $\omega$	8	2006 年

星光系列激光主要用于基础实验. 神光系列激光主要用于较为综合的实验. 神光 I 装置于 1986 年建成, 它的两束激光输出能力为: 1.6kJ/1 $\omega$ /1ns. 神光 I 直接驱动获  $5 \times 10^6$  中子产额, 间接驱动获  $1.0 \times 10^4$  中子产额, 冲击波压强达 0.8TPa.

在 2000 年前, 由于激光驱动器规模小(输出能量小, 2 束激光打靶), 我国激光核聚变实验研究主要通过开展基础研究来锻炼队伍, 发展技术. 经过 20 年的发展, 到上世纪末, 在研究队伍建设、基础技术掌握和基本条件建立方面取得重大进展. 2000 年, 以神光 II 激光装置建成为标志的实验条件改善, 使激光核聚变实验研究进入了一个新的时期, 标志着我国在这方面的研究由以基础研究与能力发展为主要目标转变到以应用基础研究为主要目标, 并牵引能力发展.

由于点火需要兆焦耳级的激光装置, 所以神光 II 和神光 III 原型等这样的装置主要用来进行物理分解实验研究. 因为激光聚变属于高能密度物理领域, 点火燃烧是极其复杂和综合的物理过程, 因此分解实验十分必要.

在 2000 年建成的神光 II 装置具有 8 束三倍频激光输出, 在物理实验中可以保证 2kJ/1ns 激光注入黑腔<sup>[7]</sup>. 2005 年在神光 II 上又建成了第 9 束激光束, 用于背光照相. 第 9 路激光的输出能力为: 二倍频能量 1500J, 脉宽 1—2ns, 蝇眼透镜束匀化; 三倍频能量 1200J, 脉宽 1—2ns, 蝇眼透镜束匀化; 三倍频能量 300—1200J, 脉宽 0.2—1.0ns.

神光 III 原型装置既是神光 III 主机的工程样

机,又是用于惯性约束聚变(ICF)实验研究的大型铷玻璃固体激光装置,其输出能力为:8束,0.35 $\mu\text{m}$ /10kJ/1ns以及0.35 $\mu\text{m}$ /15kJ/3ns(长脉冲),并且具备初步的脉冲时间波形整形能力。

激光间接驱动 ICF 可分为两大过程:(1)激光-X射线转换过程,即激光由入射孔注入黑腔产生辐射场的过程,这是黑腔物理研究的内容;(2)内爆压缩和聚变点火燃烧过程,即辐射场驱动内爆,使得聚变燃料达到点火和传播燃烧所需的温度与密度条件的过程,这是内爆物理研究的内容。与黑腔物理相关的内容有:黑腔辐射温度以及激光与等离子体相互作用等;与内爆物理相关的内容包括:内爆压缩的对称性、中子产额、流体力学不稳定性等。此外,对 ICF 的研究需要了解材料的状态参数:高压状态方程(EOS)和辐射不透明度(opacity)。这些构成了间接驱动 ICF 的分解实验内容。

#### 4.1 神光 II 装置上的物理实验

2000年神光 II 激光装置建造完成以后,就成为国内“十五”期间最主要的激光聚变实验的研究装置。在神光 II 装置上,开展了许多分解实验研究:(1)黑腔辐射温度;(2)内爆物理;(3)流体力学不稳定性;(4)辐射不透明度;(5)辐射驱动冲击波。

因实验内容很多和篇幅所限,本文仅介绍神光 II 上一些有特色的实验结果:内爆压缩过程背光照相与辐射不透明度。其他的内容只作简要概述。

黑腔:腔靶一般采用两端开激光注入孔的圆柱体,腔的轴向沿南北方向,8束激光分成两组南北各4束,南北4束激光为夹角45°的四棱锥结构,同时分别穿过两个 $\Phi 380\mu\text{m}$ 小孔,将总2000J三倍频激光注入黑腔靶。在神光 II 三倍频8束准方波激光条件打靶下,研究了三种有代表性的黑腔的辐射温度,这三种圆柱型黑腔分别为小黑腔、内爆和输运腔。高温小腔( $\Phi 600\times 500\mu\text{m}$ )的辐射温度可达190eV;辐射驱动内爆的黑腔尺寸为 $\Phi 800\mu\text{m}$ (直径) $\times L 1350\mu\text{m}$ (长度)、辐射输运黑腔尺寸为 $\Phi 800\mu\text{m}$ (直径) $\times L 1700\mu\text{m}$ (长度)。内爆黑腔的辐射温度一般为170eV,输运腔的辐射温度通常为160eV<sup>[8]</sup>。

内爆物理:研究内容包括中子产额、对称压缩调节、压缩过程照相等。在中子产额方面,在直接和辐射驱动内爆时,DT中子产额分别达到 $3\times 10^9$ /发和 $10^8$ /发<sup>[9,10]</sup>;在对称性调节方面,改变黑腔的长度(1200,1350和1500 $\mu\text{m}$ ),可以得到不同的空间和时间分布的辐射场,获得不同形状靶球压缩结果,从而判断内爆压缩的对称性。实验结果表明,腔长在

1350 $\mu\text{m}$ 时,内爆压缩接近球形。同时中子产额测量也高于其他长度黑腔下内爆压缩的中子产额。由此确定了神光 II 上内爆物理实验中的“标准黑腔”尺寸为: $\Phi 800\mu\text{m}\times L 1350\mu\text{m}$ ;对于压缩过程照相,获得了基于背光技术的清晰内爆推进层运动背光图像,得到了内爆压缩随球壳厚度变化、内爆二维形变随时间变化和芯部自发光强度空间分布,由背光图像得到内爆速度为 $1.0\times 10^7\text{cm/s}$ 。

流体力学不稳定性:获得样品烧蚀面扰动增长的多分幅和扫描图像,获得增长因子的大小在10至20之间<sup>[11,12]</sup>。

辐射不透明度:在不透明度实验中,采用具有独创性的泡沫屏蔽层的腔靶作为辐射加热源,腔等离子体和散射激光的影响均得到了有效抑制,在较低激光能量下获得的铝等离子体样品温度高达95eV<sup>[13-16]</sup>。

辐射驱动冲击波:在辐射驱动冲击波实验中,解决了间接驱动屏蔽杂散光的问题,获得了清晰的辐射烧蚀台阶 Al 样品冲击波图像<sup>[17]</sup>,激光能量为2.05kJ,冲击波速度为40.6km/s,实验冲击波速度不确定度约2%。

##### 4.1.1 内爆压缩过程照相

通过对靶丸的压缩过程进行背光照相,可以获得具有一定精度的时间分辨靶球内爆背光图像,以便研究辐射驱动内爆的对称性问题和分析内爆推进层运动过程,并与数值模拟程序进行比对。

基本靶结构和实验记录方式如图2所示,图中水平方向背光靶和靶球中心连线即背光成像的主轴。实验用靶由主靶和背光靶构成,记录设备为X射线分幅相机。主靶的结构由柱腔和靶丸构成,金柱腔:直径 $\Phi 800\mu\text{m}$ ;腔长 $L$ 有两种:1350 $\mu\text{m}$ 和1500 $\mu\text{m}$ ;入射口: $\Phi 380\mu\text{m}$ ;双诊断口对穿: $330\mu\text{m}\times 330\mu\text{m}$ 。靶球:直径 $\Phi 230\mu\text{m}$ ;塑料球壳厚度为14 $\mu\text{m}$ 和17 $\mu\text{m}$ 两种;充气:纯 $\text{D}_2$ 密度1.8mg/cm<sup>3</sup>。背光靶:镀钯(Pd),厚度大于3 $\mu\text{m}$ 。8束激光从腔靶的两端注入孔分别注入。第九路激光能量1.5kJ,脉宽2ns,波长526.5nm,激光加列阵透镜后从斜45°法兰均匀辐照背光平面靶。

图3显示标准腔( $\Phi 800\mu\text{m}\times L 1350\mu\text{m}$ )靶球(壳厚14 $\mu\text{m}$ )内爆压缩的背光图像。图中所显示的数字为记录的时刻。由图3看出,标准腔的压缩对称性较好。图4显示长腔( $\Phi 800\mu\text{m}\times L 1500\mu\text{m}$ )靶球(壳厚14 $\mu\text{m}$ )内爆压缩的背光图像,由于辐射驱动两极强于赤道,故内爆靶球被压缩成为薄饼状,背光

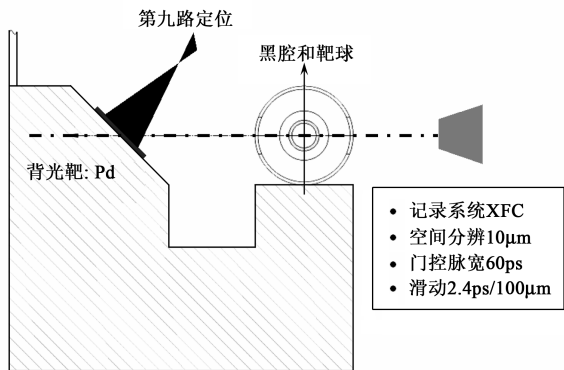


图 2 内爆背光靶与实验记录示意图(轴向)

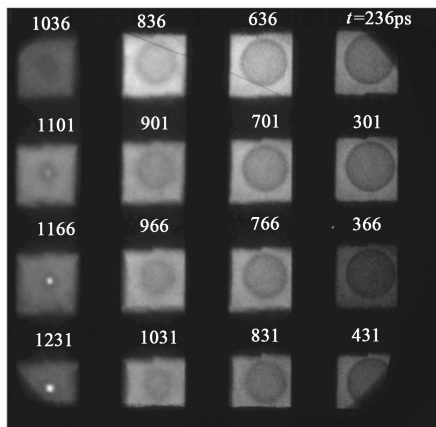


图 3 标准腔的内爆压缩分幅背光图像

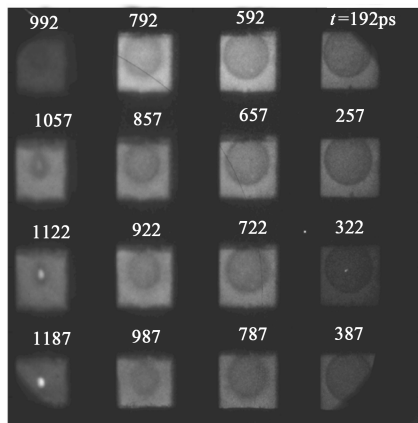


图 4 长腔的内爆压缩分幅背光图像

照相很好地记录下了这一演变过程。不过,由于成像系统分辨有限、靶芯自发射干扰和背光源局部不均匀等不利因素的存在,靶球内爆的高阶不对称性和内爆后期的内界面位置尺寸都无法从这些图像中获取。

将分幅相机门控脉冲引出与激光脉冲比较,使 X 射线信号与激光信号在时间上关联起来。在图 5 中,时间零点为主激光脉冲前沿半高宽时刻,对应的数据点为制靶测量值。该图给出了靶球(对应于图 3)在标腔辐射驱动下,内爆推进层内界面的运动轨

迹,并与 Multi-1d 的模拟结果进行了比较。在内爆加速阶段,二者较为一致。在内爆后期,由于自发光等因素影响,实验测量不确定度很大,而且计算模型也较为粗糙,所以两者的偏离也是可以预期的。粗略估计靶球的内爆速度分别约为  $1.2 \times 10^7$  cm/s ( $\delta=14\mu\text{m}$ )。

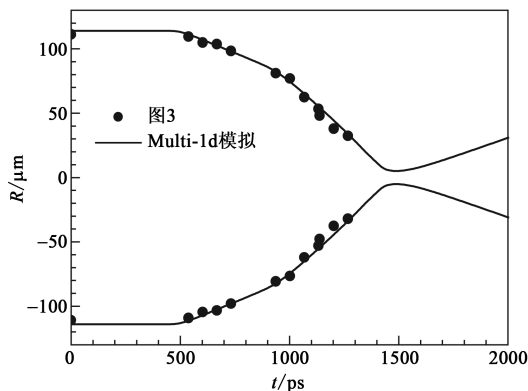


图 5 对应图 3 的靶球推进层运动轨迹

图 3 和图 4 为时间分幅的二维图像,其优点是可以反映压缩对称性二维信息,缺点是时间不连续。所以采用另外的测量设备来补充,就是利用 X 射线条纹相机来记录内爆时间连续的一维空间图像。实验布局与图 2 类似,不同的是第九路激光斜  $22.5^\circ$  入射背光靶,背光靶平面与水平面成  $22.5^\circ$  夹角,背光材料为 Ag,测量设备换成 X 射线条纹相机。

靶参数:金柱腔: $\Phi 800\mu\text{m} \times L1350\mu\text{m}$ ;入射口: $\Phi 380\mu\text{m}$ ;双诊断口: $350\mu\text{m} \times 350\mu\text{m}$  方孔,两诊断孔均贴  $3\mu\text{m}$  厚的 CH 膜;靶球: $\Phi 260\mu\text{m}$ ,壳层总厚度  $20\mu\text{m}$ (聚苯乙烯(PS)和聚乙烯醇(PVA)的厚度分配由制靶的实际情况和保气等需要而定),充气是充纯 DD 气体,其质量密度  $\rho_{\text{DD}}=1.8\text{mg}/\text{cm}^3$ 。

实验中,神光 II 装置 8 束激光同时注入标准柱腔靶,所产生的 X 射线驱动位于柱腔中心的靶丸内爆,第九路激光辐照 Ag 盘靶产生的 L 线( $3d \rightarrow 2p$ )作为背光源对内爆靶丸进行透视照相。实验结果如图 6 所示。图 6 是内爆靶丸壳层运动轨迹,与图 5 用 X 射线分幅相机得到的结果相近。对图 7 进行数据处理,可以获得内爆靶丸的内爆速度约为  $1.0 \times 10^7$  cm/s,且靶丸壳层的运动是一个变加速度的加速过程,不同时刻的速度和加速度都是变化的,很难用单一的速度描述靶丸的运动,这里的内爆速度是一种平均速度。

#### 4.1.2 辐射不透明度

高温等离子体物理有两个最基本的物态参数:一个是辐射不透明度,另一个是状态方程。辐射不透明度决定物质的辐射性质,主要研究辐射吸收与物



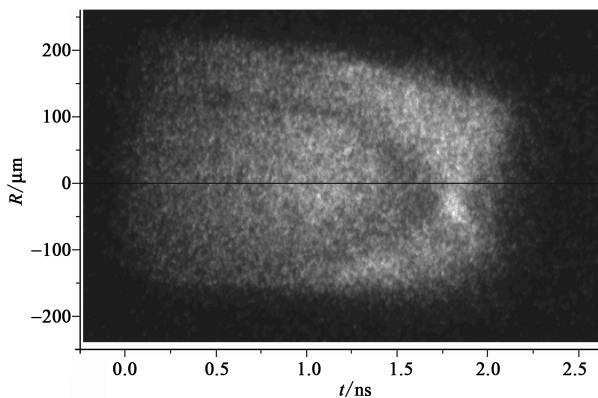


图 6 X 射线条纹相机获得内爆的连续图像

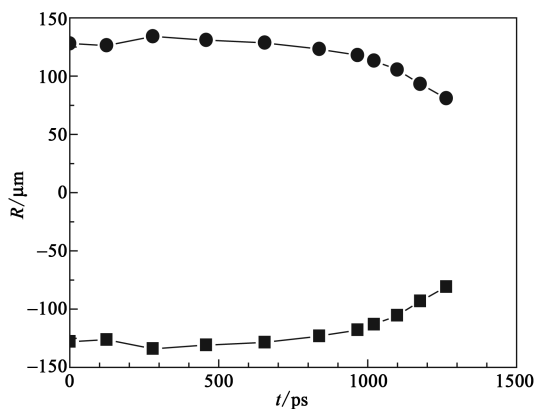


图 7 由条纹图像获得内爆靶丸运动轨迹

质类型及其温度密度的关系;状态方程决定物质的力学性质,主要研究压力与物质类型及其温度、密度的关系。

针对神光 II 激光能量为 2.5 kJ 的条件,提出了新的辐射不透明度实验靶设计<sup>[13-16]</sup>,实验表明,该靶型可以产生干净的辐射场,样品温度达到 95 eV,而美国 Nova 实验用 15 kJ 只获得 58 eV<sup>[18]</sup>。

根据辐射输运实验的一些结果和理论分析,设计了新的不透明度测量的靶型(见图 8),这种靶型的优点在于:(1)辐射在泡沫中超声速传播和高效率输运,加热产生高温样品;(2)泡沫阻止散射激光和腔等离子体的影响,避免样品直接受到激光或散射激光的辐照,形成高温低密度冕区等离子体,从而偏离局域热动平衡(LTE)状态;(3)采用 CH/Al/CH“夹心饼”结构,一方面限制样品在真空界面膨胀,形成较大的温度、密度梯度,另一方面限制样品从横向边界传入稀疏波引起横向不均匀性,从而保证样品均匀性<sup>[14]</sup>。

实验靶参数如下:

腔靶参数: Au 材料,尺寸为  $\Phi 700\mu\text{m} \times 2000\mu\text{m}$ ;样品参数: Al 样品厚度为  $(0.10 \pm 0.01)\mu\text{m}$ ,面积  $900\mu\text{m} \times 170\mu\text{m}$ ; CH 覆盖层厚度  $0.5\mu\text{m}$ ,面积  $1000\mu\text{m} \times 380\mu\text{m}$ ;

泡沫阻挡层参数:  $\Phi 780\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ ;背光源参数: 金丝(端面镀厚度为  $10\mu\text{m}$  的 CsI),截面尺寸  $60\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ ,长度  $1200\mu\text{m}$ ,表面覆盖  $50\mu\text{m}$  的 CH 材料.实验中的主要诊断设备为一台 PET 晶体谱仪,用于 Al 吸收谱测量。

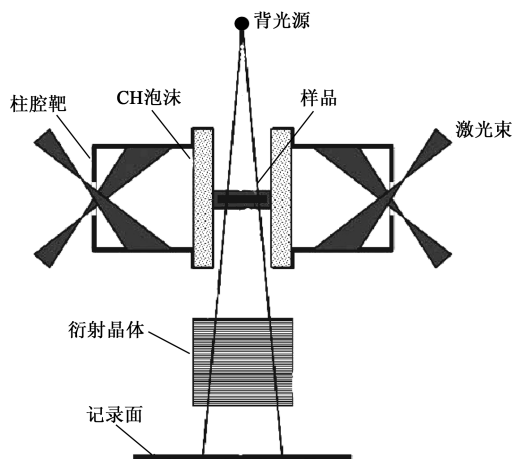


图 8 不透明度的实验靶型和实验布局

实验中的激光参数为: 8 束主激光,三倍频,脉宽 1.0 ns,每路能量 260.0 J;第 9 束激光: 从东上  $45^\circ$  入射;三倍频,脉宽 130.0 ps,能量 130.0 J,聚焦打靶.图 9 为 Al 的吸收谱的实验曲线,图中实线为实验结果,虚线为辐射不透明度程序计算的曲线,由图 9 知道,Al 样品的电子温度可达 95 eV。

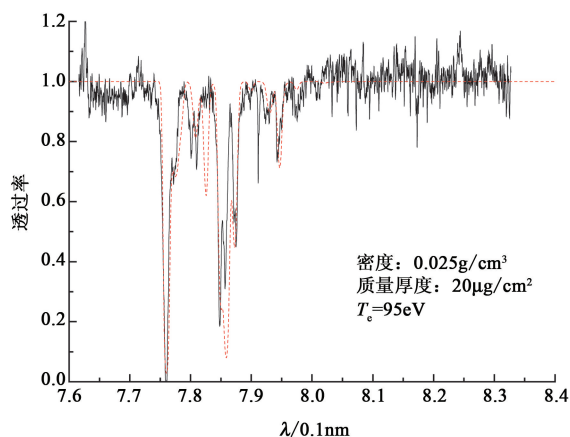


图 9 Al 等离子体辐射吸收谱

#### 4.2 神光 III 原型上的物理实验

神光 III 原型装置的主要特点是相对于神光 II 装置驱动能量高,既可以 8 束激光从柱腔的两端注入,又可以 8 束激光单个方向注入柱腔(称之为单端驱动),驱动打靶产生较高辐射温度的黑腔辐射源,同时具备一定的激光脉冲整形能力。

神光 III 原型装置于 2006 年完成,2007 年在神光

III 原型装置上开展了首轮物理实验. 首轮物理实验内容为: 黑腔物理和辐射驱动内爆. 黑腔物理实验分别研究了激光能量沉积空间位置、黑腔内 Au 等离子体填充特性、三倍频激光腔靶耦合特性. 黑腔物理实验的主要实验结果为: (1) 采用薄壁腔靶获得了腔内 8 束激光弹着点 X 射线发射图像, 瞄准精度好于  $50\mu\text{m}$ , 证明了目前激光器瞄准精度已经满足实验要求; (2) 初步建立了  $5\text{kJ}/1\text{ns}$  条件下的高温应用辐射源: 半能量点激光 ( $5\text{kJ}$ ,  $1\text{ns}$ ) 注入输运腔 ( $\Phi 1.0\text{mm} \times 2.1\text{mm}$ , LEH  $\Phi 0.7\text{mm}$ ), 辐射温度为  $175\text{--}180\text{eV}$ ; 半能量点激光 ( $5\text{kJ}$ ,  $1\text{ns}$ ) 注入内爆标准腔 ( $\Phi 1.0\text{mm} \times 1.7\text{mm}$ , LEH  $\Phi 0.7\text{mm}$ ), 辐射温度约  $185\text{eV}$ . 另外, 全能量点激光 ( $7.7\text{kJ}$ ,  $1\text{ns}$ ) 注入内爆标准腔 ( $\Phi 1.0\text{mm} \times 1.7\text{mm}$ , LEH  $\Phi 0.7\text{mm}$ ), 辐射温度约  $200\text{eV}$ ; 全能量点激光 ( $6.7\text{kJ}$ ,  $1\text{ns}$ ) 注入高温小腔 ( $\Phi 0.8\text{mm} \times 0.8\text{mm}$ , LEH  $\Phi 0.6\text{mm}$ ) 辐射温度约  $225\text{eV}$ <sup>[19]</sup>. 辐射驱动内爆物理实验主要进行 3 个方面的实验研究: (1) 内爆对称性调控: 利用芯部等离子体自发光成像, 观察靶球内爆压缩形状. 在半能量约  $5\text{kJ}/8$  束/ $1\text{ns}$  运行情况下, 辐射温度约为  $180\text{eV}$ . 当黑腔尺寸为  $\Phi 1000\mu\text{m} \times 1700\mu\text{m}$  时, 采用直径约  $\Phi 320\mu\text{m}$  的靶丸, 可以实现获得形状因子  $a/b$  接近 1 (较为对称) 的辐射驱动内爆; (2) 内爆燃料界面标识: 通过示踪元素发射的特征线, 诊断推进层—燃料界面形状. 通过示踪元素单色成像数据, 得到内爆收缩比略大于 10 倍, 可以导出相近的压缩后燃料平均密度约  $2\text{g}/\text{cm}^3$ ; (3) 次级中子和燃料面密度诊断: 通过比较对称的高温辐射驱动靶丸内爆, 获得较高内爆中子产额, 利用初次级中子比诊断燃料面密度<sup>[20,21]</sup>. 实验中得到最高的次级 DT 中子产额达  $1.4 \times 10^5$ , 初级 DD 中子  $3.3 \times 10^8$ ,  $\langle \rho R \rangle$  大约为  $4\text{mg}/\text{cm}^2$ . 对应平均密度略大于  $2\text{g}/\text{cm}^3$ , 与示踪法获得的结果基本一致. 燃料平均面密度  $\langle \rho R \rangle$  的不确定度为  $\sim 35\%$ .

2008 年, 在神光 III 原型装置上, 用 8 束激光并束单端注入的  $1\text{ns}$  方波和  $3\text{ns}$  整形脉冲驱动黑腔来进行辐射驱动冲击波实验, 得到结果为: (1)  $6.5\text{kJ}$ ,  $1\text{ns}$  激光注入半腔靶 ( $\Phi 1.0\text{mm} \times L 0.8\text{mm}$ , LEH  $\Phi 0.65\text{mm}$ ), 得到辐射温度约为  $220\text{eV}$ ; (2)  $2\text{ns}$  的三台阶整形脉冲激光 ( $8 \times 500\text{J}$ ) 驱动半腔靶 (与  $1\text{ns}$  的半腔靶尺寸不同), 得到了三台阶辐射温度波形; (3) 获得了清晰的辐射驱动 Al 样品的冲击波图像.

整形激光脉冲驱动腔靶实验以前国内未开展, 在此作简要介绍. 神光 III 原型 8 束激光相对柱腔轴线成  $45^\circ$  角方向从腔靶注入孔注入腔内, 8 束激光单端打靶, 聚焦注入, 激光脉冲形状为三台阶, 台阶时间宽度分别

为  $1.5\text{ns}$ 、 $1.0\text{ns}$  和  $0.5\text{ns}$ , 三台阶激光功率对比度为  $1:4:16$ , 每束三倍频激光能量为  $500\text{J}$ .

半腔靶  $\Phi 1.4\text{mm} \times 1.2\text{mm}$ , 激光注入孔 LEH  $\Phi 0.7\text{mm}$ , 金封底后开诊断孔,  $\Phi 0.4\text{mm}$ , 孔上贴  $0.5\mu\text{m}$  厚的 CH 膜. 利用一台软 X 射线能谱仪从激光注入孔测量黑腔辐射温度, 此谱仪与注入孔法线方向成  $20^\circ$  角观测. 图 10 给出了三倍频激光功率 ( $P_L$ ) 波形与辐射温度 ( $T_r$ ) 波形的比较. 辐射温度  $T_r$  也有三个台阶, 对应的温度分别为  $88$ 、 $130$ 、 $173\text{eV}$ . 为了比较激光功率波形与 X 射线功率波形, 将图 10 中的激光功率波形归一化 ( $P_L$ ), 也将图 10 中辐射温度转换成 X 射线功率波形并归一化 ( $P_x$ ), 得到图 11. 可以看出, 两个波形的三台阶高度比值基本相同, 只是 X 射线功率波形峰值位置比激光功率波形峰值位置要晚约  $230\text{ps}$ .

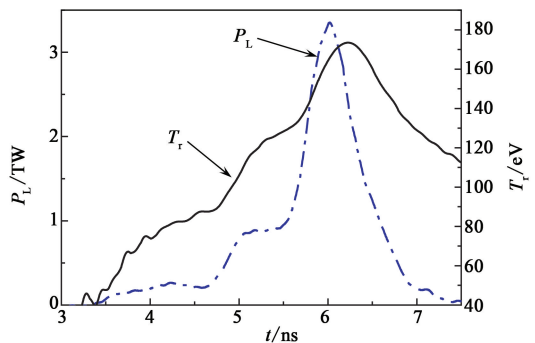


图 10 激光功率 ( $P_L$ ) 波形与辐射温度 ( $T_r$ ) 波形比较

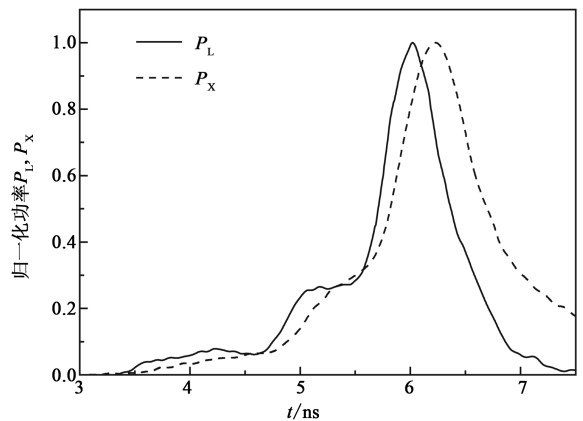


图 11 归一化的激光功率波形和 X 射线功率波形比较

## 5 国内 ICF 诊断技术研究进展

我国激光聚变诊断技术随着一系列基于不同激光装置 (星光、神光等) 的物理实验的开展得到了长足的发展, 能够测量的物理量种类从上世纪 70 年代末



的激光能量、等离子体能量、激光转换效率等少数几种宏观物理量,发展到如今在神光 II 和神光 III 原型装置上一次综合物理实验中可以同时提供十多种宏观和微观物理量,诊断设备也由几套简单设备发展到目前 30 种基于一定精度的成套诊断系统<sup>[22]</sup>. 特别是在 X 射线单能成像<sup>[23]</sup>、Thomson 探针<sup>[24]</sup>、大动态范围 X 射线条纹相机<sup>[25]</sup>、高性能 X 射线分幅相机、单级衍射光栅<sup>[26-28]</sup>、KBA 显微镜<sup>[29]</sup>等新型关键诊断技术与尖端设备研制方面进行了很有特色的工作. 同时人员技能和方法技术也得到了较大提高,能够完成复杂的大型实验的综合诊断任务.

ICF 实验研究的对象是由高功率激光与各种结构的微靶相互作用产生的高温高密度等离子体. 精密诊断系统的主要功能是通过测量来自靶等离子体的辐射和高能粒子的时空与能谱特性,分析诊断流体状态和能量流的时空演化特性.

### 5.1 ICF 精密诊断系统的构成

神光系列精密诊断系统由四大分系统组成:触发系统;靶室主诊断设备;探针光系统;实验数据采集和管理系统.

触发系统:以 15—100ps 的同步精度,起动超快速相机、瞬态仪、快速示波器及所有单次动作的设备,确保高时间分辨的设备捕捉到激光打靶实验信号.

靶室主诊断设备:由位于靶室内外及周围的上百种测量探头及设备组成,用以诊断等离子体的各种辐射;此外还包括激光打靶透镜背反射光测量装置. 诊断设备包括四大类型:X 射线谱仪、光学谱仪与成像系统、X 射线成像系统、聚变产物诊断系统,见表 2.

探针光系统:属“主动式”诊断系统,主要包括:Thomson 探针系统(0.263 $\mu\text{m}$ ,50J/ns);紫外全息干涉探针系统(0.35 $\mu\text{m}$ ,mJ/30ps);X 射线背光源(由神光 II 第九束辐照各种材料的平面背光靶或点背光靶产生).

实验数据采集和管理系统:该分系统采用网络技术,包括数据库和数据分析处理平台,是以微机局域网为基础的“二级两网段”的采集、处理和管理系统. 并网物理测试节点二十余个,一次打靶采集实验原始数据、预处理结果以及相关参数近 2GB. 在每发打靶实验 5 分钟后,可通过数据采集和处理中心的文件系统查询、处理和调用实验数据,半小时内可通过数据库系统查询、调用打靶的实验数据和预处理结果,并为总体人员输出结果报表.

表 2 神光 II 与神光 III 原型上的诊断设备表

X 射线谱仪(12 种)	光学谱仪与成像系统(10 种)
7 道软 X 射线能谱仪	光学条纹相机
15 道软 X 射线谱仪(原型)	光学多道分析器
透射光栅谱仪	光学成像组件
滤波荧光谱仪	Thomson 散射测量系统
平面晶体谱仪	被动式冲击波测量系统
时间分辨晶体谱仪	热释电等离子体卡计阵列
门控平场光栅谱仪	PIN 散射光探测器阵列
门控晶体谱仪	背反测量系统
透射式弯晶谱仪	近背反测量系统
单光子计数 CCD	成像型 VISAR(原型)
平面镜高时间分辨三色谱仪	
X 射线多层镜单色谱仪	
X 射线成像(9 种)	聚变产物诊断(8 种)
大动态 X 射线条纹相机	中子飞行时间谱仪
环孔编码成像系统	塑料闪烁探测器
二维单色晶体成像系统	BF <sub>3</sub> 中子探测器阵列
平面镜单色成像系统	Cu 活化 $\gamma\gamma$ 符合计数系统
针孔相机	1000 只大阵列中子探测器(原型在建)
KBA X 射线显微镜	活化样品跑兔装置
背光照相技术	金刚石中子探测器
X 射线条纹相机	聚变反应速率测量系统(原型在建)
X 射线分幅相机	

由前所述,神光 II 和神光 III 原型精密诊断系统可在一次打靶中通过 20 余种诊断装置(100 多个探测器),提供 200 余条信号线和 10 余幅高时空分辨的图像.

诊断系统已应用于激光—等离子体相互作用的各种实验,可测量背散射光的光谱时空特性、等离子体角分布、散射光角分布、X 射线角分布、等离子体状态参数(温度、密度)、烧蚀质量等物理量;在黑腔物理方面,诊断系统可测量不同方位时间分辨辐射温度、时空分辨辐射能谱、超热电子温度和份额、非线性光份额;在内爆动力学方面,诊断系统可测量内爆速度、收缩比、燃料密度、内爆对称性、中子产额、离子温度等;在辐射输运方面,可测量时间分辨的辐射流强度及辐射传输时间;在 Opacity 研究方面,可测量时间分辨的 X 射线吸收率、与 Rosseland 平均自由程相关的“辐射热波传播时间”等.

### 5.2 ICF 诊断系统指标

X 射线诊断能力可达:时间分辨 10ps,空间分辨 10 $\mu\text{m}$ ,能谱分辨 1/100 至 1/8000,能量测量不确

定度 20%，强度测量不确定度 16%。

从红外到紫外的光学诊断能力达：时间分辨 2ps，空间分辨 2 $\mu\text{m}$ ，光谱分辨 0.05nm，能量测量不确定度 5%，强度测量不确定度 10%。

聚变产物：中子产额 10<sup>4</sup>—10<sup>10</sup>，不确定度 11%—100%； $\alpha$  粒子空间分辨 10 $\mu\text{m}$ ；14MeV 中子能谱分辨 1.6%。

### 5.3 近期发展有特色的诊断技术

这里，将着重介绍近几年在诊断技术方面有特色的研发工作：内爆界面表征技术与单级衍射光栅。

#### 5.3.1 内爆界面的表征技术

在内爆过程中，靶丸推进层与燃料界面由于流体力学不稳定性产生的畸变，以及由于驱动不对称产生的大尺度形变等对内爆效率有严重影响。燃料界面的实验观测是研究这些问题的有效途径，而且界面图像可以准确反映燃料区的压缩形状。为了获得靶球压缩形状或燃料压缩密度，需要知道燃料的界面，可以通过测量高温燃料区发射 X 射线谱图像或掺杂元素的特征谱线，获得燃料区的压缩形状、温度和密度等信息。虽然可以通过初次级中子产额比而获得燃料面密度的内爆关键物理信息，但是由于神光 II 上的次级中子产额低，用初次级中子产额比方法来获得面密度对于神光 II 装置来说是不可行的。只有考虑其他方法来获取内爆界面的信息，进而获得燃料的面密度。

通常的针孔成像选配通滤片的 X 射线成像技术由于观测能区较宽，连续谱成分占了很大贡献，故单纯用此方法很难明确指明所获图像对应的空间区域，因而在用于靶丸内爆燃料区界面诊断时便难以给出准确的界面位置及相应的燃料区尺寸。如果在靶球特定区域内掺杂一定量的示踪元素，由于在靶球压缩过程中把示踪元素加热后会发射谱线，用空间分辨的诊断设备测量其发射谱空间分布，可以得到靶球内爆的信息，如燃料界面、电子温度和密度等。在靶球设计中，掺杂元素选择要合适，为了避开黑腔内等离子体发射的影响，而且需要有一定的穿透能力，一般采用 K 特征谱线，因此，示踪元素加热后既不要过电离，也不要电离不够，这样才能获得足够强的谱线信号。在不影响靶球压缩特性的条件下，元素掺杂量也需要严格控制，掺杂过多会影响靶球压缩特性，量过少会影响谱线发射强度。根据不同的物理需求在不同的空间位置掺杂一定量的示踪元素，推进层内表面涂合适厚度的硫(S)层，才能测量到足够强的发射谱，因为 S 层太薄，则由于离子数目太少而使得谱线发射很弱；由于只是靠近 S 层才能

发射 K 线，如果 S 层太厚，则外面相对较冷的 S 层的吸收很强，这样测量到的发射谱也较弱。数值模拟表明，当 S 层厚度 ~50nm 时，S 层的 Ly- $\alpha$  发射最强。

内爆界面的测量原理见图 12。由于垂直于色散方向的针孔连线与相应的晶格方向有一个小角度，则在某一谱线位置沿垂直于色散的方向读取强度数据，得到针孔阵列像与该谱线相切的各条弦的强度分布，这样，根据该系统的测量原理(参见图 12)，以及测量系统的相关参数，就可合成得到被测目标在这一谱线处的单色二维图像<sup>[23]</sup>。采用记录介质为成像板的针孔阵列—平面晶体谱仪诊断系统，该诊断系统设计成具有很宽的观测能谱范围，可以在一发次打靶中同时获得 Ar 和 S 多条谱线的二维单色图像，通过同一发中 Ar 和 S 发射区的尺寸值的比较，便可得到球壳内界面(即燃料区界面)的位置及尺寸。

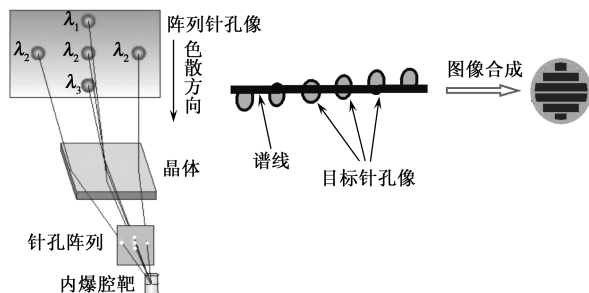


图 12 针孔阵列——平晶谱仪单色二维成像测量系统原理示意图

实验使用的腔为标准腔靶，靶球尺寸和结构为： $\Phi 300\mu\text{m}$ ，壳层总厚度 15 $\mu\text{m}$ （材料为 PS，PVA 以及 CH），内表面涂厚度小于 50nm 的硫(S)层，靶球内充氦气，密度  $n_{\text{DD}} = 1.5\text{mg}/\text{cm}^3$ ，掺 Ar 原子比 1%。图 13 为实验获得氦燃料中掺 Ar、且球壳内表面涂 S 的靶丸的单色二维图像典型结果。燃料界面尺寸为 23 $\mu\text{m}$ ，由靶球的初始直径和氦燃料初始密度可知其内爆收缩比为 11.7，燃料压缩密度为 2.9g/cm<sup>3</sup>，这超过 10 倍液氦密度(0.14g/cm<sup>3</sup>)。

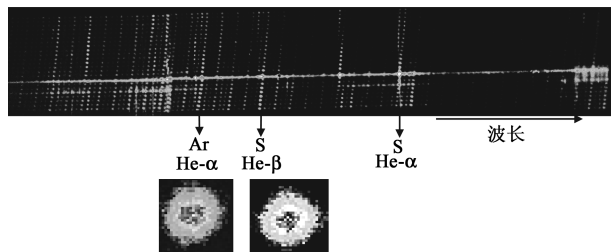


图 13 实验中获得的燃料区掺杂 Ar 和壳层内表面 S 的单色二维图像

#### 5.3.2 单级衍射光栅的研制

衍射光栅是光谱学、光谱分析技术中的重要元

件,被称作“为科学研究各领域提供最重实验信息的元件”。在激光聚变研究中,衍射光栅主要被用来测量激光等离子体辐射的各种光谱,借以分析和描述激光等离子体的各种行为.基于透射衍射光栅的软 X 射线透射光栅谱仪是激光聚变研究的重要诊断设备之一,它可以提供对 ICF 至关重要的黑腔辐射的高分辨 X 射线谱.

现有的黑白透射光栅均表现为多级衍射的特征,衍射谱和波长并不是一一对应的关系.这一特征在很多情况下为衍射光栅的应用带来了限制.首先,光栅作为光谱仪应用时,其测量谱不能直接反映被测光源的辐射谱,高级衍射谱将叠加在一级谱上,带来一定的误差;其次,光栅作为单色仪使用时,高次谐波将无法被消除,从而给获得的单色光束带来污染.因此,多年以来,应用于激光聚变研究的光栅谱仪一直受所谓高级衍射干扰的影响,测谱精度受到很大制约,数据置信水平受到很大限制.

在对传统透射光栅的衍射模式进行认真理论研究的基础上,激光聚变研究中心的研究人员提出了余弦窗口正弦透射光栅的概念<sup>[26]</sup>.利用控制随机针孔阵列密度分布的办法,可以制作出透过率函数与余弦窗口正弦光栅完全一致的软光透射衍射光学元件,称之为软光谱学光子筛.软光谱学光子筛概念的提出,使余弦窗口正弦光栅的概念实用化,在软光透射光栅谱学当中得到实际的应用.利用这种光学元件替代透射光栅进行光谱学研究可排除高级衍射和次级衍射峰的干扰,可大幅度提高透射光栅谱测量的精度和信噪比.理论研究和计算模拟表明,这种新的衍射元件不存在高级衍射,不存在次级衍射峰,具有光滑的主衍射峰,确定的衍射效率,其衍射模式比传统透射光栅优越得多.这种光栅称之为量子点阵列衍射光栅(QDADG),也俗称为单级衍射光栅.

图 14 为等效于每毫米 50 线对的 QDADG 的显微照片,图 15 为典型的 CCD 记录的 640nm 的衍射图像,可以看出,QDADG 只存在 0 级和 $\pm 1$ 级衍射而无高级衍射.使用 QDADG 对 440—1100nm 的光衍射,均得到类似的结果.

QDADG 不存在高级衍射,只存在 0 级和 $\pm 1$ 级衍射,其衍射模式比传统透射光栅优越得多,光谱实验数据的信噪比达到 103.同时,QDADG 的相对衍射效率在光学波段具有较好的平响应(25%左右),且其 1 级谱偏离位置随波长的变化成线性关系.这些衍射特性对于光谱测量与分析带来极大的便利.利用这种光学元件替代黑白光栅,应用于光谱学研究,可以

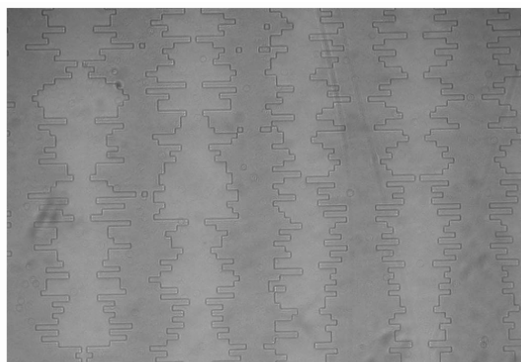


图 14 QDADG 显微照片

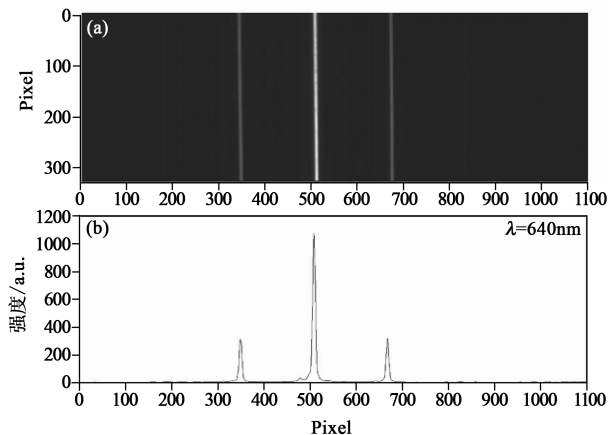


图 15 (a) CCD 记录 640nm 的衍射图像;(b)为对应(a)的衍射强度排除高级衍射和次级衍射峰的干扰,可以大幅度地提高透射光栅谱学的精度和信噪比.

随着加工技术的提高,将可以制作边长更小的量子点,从而制作出适用于紫外、X 射线波段的具有高空间频率(大于 1000 线/mm)的 QDADG.目前已制作线对数 2000 线/mm 的 QDADG,并且在北京同步辐射装置上进行了 X 射线波段的标定,与光学波段类似,只存在 0 级和 $\pm 1$ 级衍射.

## 6 结束语

近年来,开展了以黑腔辐射场特性、内爆物理、辐射不透明度等为核心内容的靶物理实验研究和诊断技术研发,取得了重大进展.“十五”期间,基于神光 II 激光装置( $8 \times 260\text{J}/1\text{ns}$ ,三倍频),实现了黑腔辐射温度约 170eV,直接驱动黑腔 DT 中子产额约  $10^9$ ,间接驱动黑腔 DT 中子产额约  $10^8$ .“十一五”前期,基于神光 III 原型激光装置( $8 \times 1000\text{J}/1\text{ns}$ ,三倍频),实现了黑腔辐射温度约 200eV,间接驱动黑腔 DD 中子产额约  $10^8$ ,将开展聚变点火关键实验技术研究,与点火靶设计的物理验证.同时,在 X 射线单能成像、Thomson 探针、大动态范围 X 射线条纹相



机、高性能 X 射线分幅相机、单级衍射光栅、KBA 显微镜等新型关键诊断技术与尖端设备研制方面取得了突破性进展,为诊断能力的完善和精度的持续提升奠定了技术与硬件基础。

### 参考文献

- [1] J. Roth, 李中兴译. 聚变能引论. 北京:清华大学出版社, 1993 [Roth J. Li Z X trans. Introduction of fusion energy. Beijing: Tsinghua University Press, 1993 (in Chinese)]
- [2] 王淦昌,袁之尚. 惯性约束核聚变. 合肥:安徽教育出版社, 1996 [Wang G C, Yuan Z S. Inertial confinement fusion. Hefei: Anhui Education Press, 1996 (in Chinese)]
- [3] 马腾才. 等离子体物理原理. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1988 [Ma T C. The principal of plasmas. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1988 (in Chinese)]
- [4] Lindl J D, Amendt P, Berger R L *et al.* Plasmas, 2004, 11: 339
- [5] Lindl J. Phys. Plasmas, 1995, 2: 3933
- [6] Cavailler C. Plasma Phys. Control. Fusion, 2005, 47: B389
- [7] Lin Z Q, Wang S J, Fan D Y *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14: 403
- [8] Jiang S, Sun K, Ding Y *et al.* Chin. Phys. Lett., 2005, 23: 2328
- [9] Peng H S, Zheng Z J, Zhang B H *et al.* J. Fusion Energy, 2000, 19: 81
- [10] Chen J B, Zheng Z J, Peng H S *et al.* Nucl. Instrum. Methods in Physics Research A, 2002, 491: 474
- [11] 袁永腾, 缪文勇, 丁永坤等. 强激光与粒子束, 2007, 19: 781 [Yuan Y T, Miao W Y, Ding Y K *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19: 781 (in Chinese)]
- [12] 袁永腾, 缪文勇, 丁永坤等. 强激光与粒子束, 2007, 19: 625 [Yuan Y T, Miao W Y, Ding Y K *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19: 625 (in Chinese)]
- [13] Xu Y, Zhang J Y, Yang J M *et al.* Physics of Plasmas, 2007, 14: 052701
- [14] Zhang J Y, Yang J M, Xu Y *et al.* Phys. Rev. E, 2009, 79: 016401
- [15] Zhao Y, Yang J M, Zhang J Y *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2009, 80: 043505
- [16] 张继彦, 杨家敏, 许琰等. 物理学报, 2008, 57: 985 [Zhang J Y, Yang J M, Xu Y *et al.* Acta Phys. Sin., 2008, 57: 985 (in Chinese)]
- [17] Perry T S, Springer P T, Fields D F *et al.* Phys. Rev. E, 1996, 54: 5617
- [18] 彭晓世, 李三伟, 安竹等. 强激光与粒子束, 2007, 19: 741 [Peng X S, Li S W, An Z *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19: 741 (in Chinese)]
- [19] 李三伟, 易荣清, 蒋小华等. 物理学报, 2009, 58: 3255 [Li S W, Yi R Q, Jiang X H *et al.* 2009, 58: 3255 (in Chinese)]
- [20] Zhao Z Q, Chen J B, Ding Y K *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2006, 77: 073502
- [21] Kang X T, Chen J B, Deng C B *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2008, 79: 086109
- [22] 郑志坚, 丁永坤, 丁耀南等. 强激光与粒子束, 2003, 15: 1073 [Zheng Z J, Ding Y K, Ding Y N *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15: 1073 (in Chinese)]
- [23] 张继彦, 杨国洪, 缪文勇等. 强激光与粒子束, 2006, 18: 939 [Zhang J Y, Yang G H, Miao W Y *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18: 939 (in Chinese)]
- [24] Niu L H, Yang Q L, Niu H B *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2008, 79: 023103
- [25] Wang Z B, Zheng J, Zhao B *et al.* Phys. Plasmas, 2005, 12: 082703
- [26] Wang C K, Kuang L Y, Wang Z B *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2007, 78: 053503
- [27] Cao L F, Foster E, Fuhrmann A *et al.* Appl. Phys. Lett., 2007, 90: 053501
- [28] Wang C K, Kuang L Y, Wang Z B *et al.* Rev. Sci. Instrum., 2008, 79: 123502
- [29] 董建军, 刘忠礼, 缪文勇等. 强激光与粒子束, 2006, 26: 1231 [Dong J J, Liu Z L, Miao W Y *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2006, 26: 1231 (in Chinese)]