

大国重器

激光惯性约束聚变

王巧巧

(中国工程物理研究院研究生院 100190)

激光惯性约束聚变被认为是人类工程物理科技领域的顶峰,这不仅是因为其实现技术难度极高,更因为其研究具有重大的科学意义。通过可控核聚变解决能源问题固然是激光聚变的研究目的之一,但其应用领域却显然不仅限于此。本文简要介绍了激光惯性约束聚变的基本概念和基本物理过程,并回顾了自激光诞生以来惯性约束聚变的发展历程。

一、可控核聚变

作为一种非常重要的能量来源,人们对核能并不陌生。众所周知,核能可以通过三种核反应之一释放:核裂变、核聚变和核衰变,其中前两种方式可以为人类提供大量能量。核聚变是指由质量小的原子(通常为氘或氚),在一定条件(如高压和超高温)下发生原子核互相聚合作用,生成新的质量更重的原子核,随之释放巨大能量的一种核反应方式,如氢弹的爆炸;核裂变是指由重的原子核(通常为铀或钚)分裂为两个或多个质量轻的原子的一种核反应方式,如原子弹的爆炸。由于核裂变较容易实

现,而核聚变的实现比较困难,因此原子弹的问世要早于氢弹。

核聚变相对核裂变有诸多优点。一方面,核聚变释放的能量一般来说比核裂变释放的能量更大。理论上核聚变反应的质能转换率为0.7%,而核裂变反应的质能转换率为0.13%,仅为核聚变反应的四分之一左右。所谓质能转换率就是质量转换为能量的能力。根据爱因斯坦质能转换方程($E=mc^2$),质能转换率越高,意味着同质量转换的能量越大,这种能源就越“厉害”。另一方面,核聚变的原料可以从海水中提取,取之不尽用之不竭。而常见的核裂变反应原料铀235储量十分稀少;更重要的一点是,核聚变几乎不会产生放射性的污染物,清洁安全也是核裂变反应难以比拟的。

正是由于核聚变具有能量高、原材料丰富、清洁安全等特点,因此人类对核聚变能量的使用无限神往。自然界本身就存在着稳定输出的核聚变能量。我们头顶的太阳就是靠着核聚变反应维持的。如何利用核聚变为人类提供无穷无尽的能源,已成为自发明火(化学能)、电(电能)后,实现下一次文明飞跃的关键所在。

目前,世界上核电站所使用的核能均来自于核裂变过程。从1942年可控核裂变人工反应堆诞生起,经过近80年发展,其技术已经较为成熟。然而可控可持续输出的核聚变反应堆却尚未实现。为什么核聚变能量的稳定获取比之核裂变要难得多呢?最主要的原因是两种反应所依据的物理规律不同。核裂变的原子核质量较大,且本身不稳定,因此只要常温常压的环境就能实现裂变反应;而核聚变反应则不同,它需要克服原子核之间巨大的静

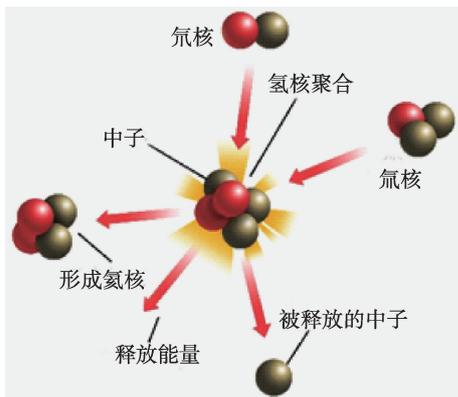


图1 核聚变过程示意图

电排斥力。没有足够的能量或特殊环境去打破静电排斥力的临界点,人们就无法把原子核融合在一起,同时释放出巨大能量。

我们如何为核聚变创造特殊的环境(高压高温)呢?以大自然最常见的核聚变反应——太阳为例。巨大的质量使其内部形成高达2000亿个大气压的超高压,再加上1500万度的温度,就可以把氢原子聚变成氦原子。非常遗憾的是,在地球上超高压条件是无法实现的,进而人们就只能在“高温”这个条件上下功夫了。也就是说,要想实现核聚变反应,我们需要把温度提高到上亿度才可以。因此,实现可控核聚变反应须解决两个最重要的问题:第一,如何将核聚变反应的材料加热到这么高的温度(解决“怎么点燃炉子里面燃料”的问题)?第二,将核聚变反应的材料加热到这么高的温度后拿什么来装它(解决“怎么防止燃料将炉子烧穿”的问题)?

我们先看第一个关于加热方法的问题。1960年激光器的诞生为如何将物质加热到极高能量这一问题打开了一扇门。前苏联科学家最早提出利用激光加热核聚变反应的材料^①。他们认为该方法可以获得较高能量,且无需与被加热物质直接接触,这类似于将阳光聚焦之后点燃木屑。由于单个激光器的输出能量太低,因此需要将多个激光器的能量聚焦到同一点。这个问题看似简单,实则非常困难:加热过程中必须保证在短暂时间内,被加热物体所有方向均匀受热,一致向球心坍塌。这不仅需要异常精确地控制每台激光器的对准方向,还要严格控制极短时间内每台激光器的输出能量。

第二个是关于“容器”的问题。上亿度的物质足够烧毁任何与其相接触的东西。那么就算能将这些反应材料点燃,我们拿什么来盛放它呢?目前一种主流的技术方案是采用惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion,简称ICF)。

介绍ICF之前,我们先了解一下它的“竞争”对手-磁约束聚变(Magnetic Confinement Fusion,简称

MCF)。磁约束聚变是以稀薄氘氚气体放电形成等离子体,在电磁约束下剧烈压缩并持续数秒使聚变反应开始。MCF主要以托克马克(Tokamak)装置为主,国际上具有代表性的托克马克装置有美国DIII-D、欧洲的JET、日本JT-60、俄罗斯T-15等^②。目前,世界上多个国家正在合作建设国际热核聚变实验堆(ITER),中国也是该项目的主要参加国之一。

ICF亦是实现可控热核聚变的主要途径之一。相对于MCF,ICF具有驱动部分与聚变反应堆部分在空间上分离、互不干扰的优点。它利用内爆产生的向心运动物质的惯性来约束高温热核燃料等离子体。可用于ICF的驱动器主要包括高功率激光装置、Z箍缩装置和重离子束装置等。Z箍缩驱动是依靠轴向电流产生的电磁力,使等离子体箍缩并向轴线运动。丝阵Z箍缩装置通过高功率脉冲装置,驱动柱形金属丝阵负载,使其加热、融解、气化并向轴心箍缩,进而释放极强的X射线辐射,利用强X射线压缩靶丸进一步实现聚变^③。重离子束驱动(Heavy-Ion Inertial Fusion,简称HIF)则是另外一种实现ICF的方式。通过多束重离子轰击靶丸,将氘氚燃料压缩到上千倍的固体密度,进而实现聚变点火^④。从技术角度来看,激光器技术发展得最为成熟。目前国际惯性约束聚变研究的重点是激光驱动惯性约束聚变(Laser Inertial Confinement Fusion,简称LICF),下面我们将详细介绍LICF。

二、激光惯性约束聚变(LICF)

LICF是直接利用激光或者利用激光产生的X射线作为驱动源,均匀地作用于装填DT燃料的微型球状靶丸外壳表面,烧蚀形成向外膨胀的高温高压等离子体,利用反冲压力,使靶的外壳极快向心运动,压缩DT主燃料层到每立方厘米几百克质量的极高密度,并使局部DT区域形成高温高密度热斑,从而达到点火条件;这些热核燃料飞散前,进行充分的热核燃烧。

我们可以将LICF归纳为四个阶段:强光辐照、内爆压缩、聚变点火和聚变燃烧。所谓强光辐照是

激光束(或X光)快速加热靶丸表面,形成一个等离子体烧蚀层;内爆压缩是利用靶丸表面热物质向外喷发,从而反向压缩燃料;聚变点火则是通过向心聚爆过程,使DT核燃料达到高温、高密度状态;聚变燃烧是热核燃烧在被压缩燃料内部蔓延,聚变放能大于驱动能量,获得能量增益。图2给出激光惯性约束聚变各阶段示意图。

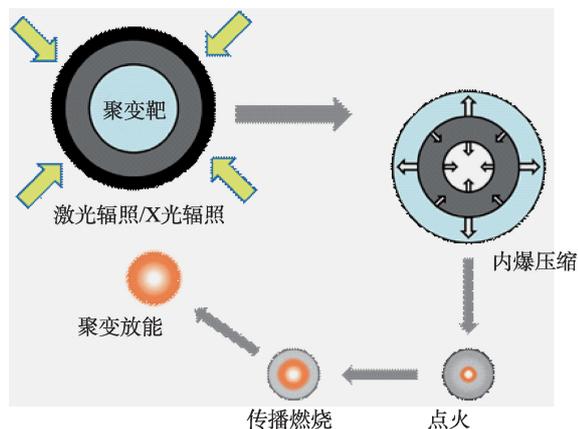


图2 激光惯性约束聚变各阶段示意图

从驱动方式角度来讲,LICF有两种不同的驱动内爆方式:直接驱动和间接驱动。在直接驱动过程中,激光束直接辐照内爆靶球,压缩聚变燃料使其到达点火和自维持燃烧条件。图3给出直接驱动的示意图。直接驱动具有激光能量利用率高且靶构形简单的特点,但其对激光束辐照均匀性的要求很高。

间接驱动^{⑤-⑦}则利用激光照射高Z材料组成的黑腔产生X射线,X射线驱动靶丸内爆实现聚变。在间接驱动过程中,激光能量被黑腔内壁吸收,腔壁升温、电离,同时辐射出大量X射线。利用这些X射线驱动内爆靶球,压缩聚变燃料使其到达点火

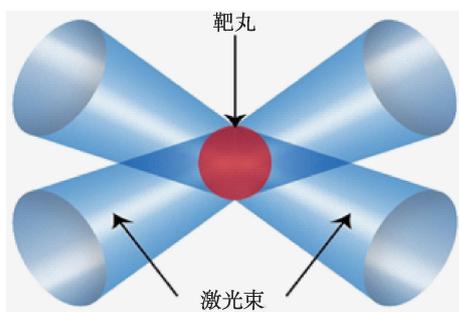


图3 激光直接驱动惯性约束聚变示意图

和自维持燃料条件。图4给出间接驱动的示意图。

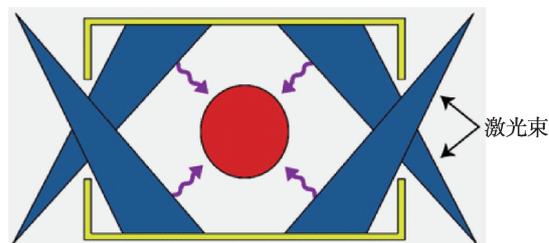


图4 激光间接驱动惯性约束聚变示意图

间接驱动具有较好的辐照均匀性,但是需要研究“激光-X光转换”这一复杂的辐射流体力学过程。当一束强激光照射到黑腔内壁时,在初期非常短的时间内激光能量通过多光子过程被吸收,内壁物质电离产生自由电子。如果动能足够大,自由电子将通过碰撞过程加速物质的电离。一旦部分电离等离子体形成,后续的激光能量将主要通过光子与电子相互作用过程(逆韧致吸收过程)被吸收。黑腔壁为高Z材料,吸收的激光能量大部分在电子热传导区转换为X光;这些X光在腔内传输,通过腔壁吸收和再发射过程使得激光光斑处产生的非平衡X光被“改造”为充满整个黑腔的均匀软X光。黑腔内X光的温度与激光能量、激光波长、黑腔大小、腔壁材料、激光入射孔大小等有很复杂的关系。激光-X光转换过程是一个典型的非平衡辐射流体力学问题。

除了直接驱动和间接驱动外,国际上也有研究小组在探索其他的驱动方式,例如我国科研人员提出混合驱动概念^⑧等。

三、研究现状

1. 国外相关领域研究

1960年激光问世以后,美国和前苏联就开始进行激光聚变研究^{①⑩}。根据当时的理论计算,若想实现能量增益(核反应能量与驱动能量的比值)大于1,即装置可以实现对外输出能量,需要很高的激光功率和能量,且远远超出当时的技术和工艺水平,因此该项研究并未引起人们的广泛关注。

1972年,美国加利福尼亚州劳伦斯·利弗莫尔

国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, 简称 LLNL)系统研究了利用激光器直接驱动DT微球内爆实现高压压缩热核聚变的技术途径,并给出激光强度达到 10^{17} W/cm²条件下1kJ能量实现点火的数值模拟结果^①。随后,洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory, 简称 LANL)、KMS聚变公司^{②③}相继阐述实现直接驱动激光聚变的主要物理思想及理论计算结果,从而引起了社会普遍关注。理论和实验研究表明,由于激光等离子体相互作用的限制,激光强度只能限制在 10^{14} W/cm²至几倍的 10^{15} W/cm²之间。考虑到流体力学不稳定性及激光等离子体相互作用的制约,激光能量100 kJ以下很难实现内爆点火。此外,受限于当时的激光技术,激光辐照的均匀性也无法满足直接驱动内爆的要求。

1975年,采用间接驱动方式实现高增益惯性约束聚变的方案被计算证实可行^④。与直接驱动相比,间接驱动具有流体力学不稳定性增长水平低、受光束不均匀性和激光等离子体相互作用产生的超热电子的影响小以及几乎不受驱动源类型限制等优点。因此,自1976年起美国将ICF的研究重点集中在间接驱动方式上。

20世纪70年代末到90年代中期,ICF研究进入快速发展时期。通过Shiva激光装置^⑤、Nova激光装置和Omega激光装置等一系列实验进行研究和评估,验证了激光等离子体不稳定性(LPI)、流体力学不稳定性及混合、高密度压缩等关键物理问题;理论设计了1.3 MJ左右激光能量下实现聚变点火和约10增益的间接驱动靶;验证了建造1~2 MJ左右激光器技术的可行性。

在这些研究的基础上,美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)于2009年建成,并于2010年开始进行点火物理实验。该装置的设计目的是用于验证聚变点火和燃烧获得中等增益。其设计输出能量1.8 MJ,最大功率520 TW,激光波长351 nm。在NIF装置建设的同时,美国于2006年启动“国家点火攻关计划”(National Ignition Cam-

paign, 简称 NIC),用于实施与点火物理相关的理论、实验和制靶等研究。

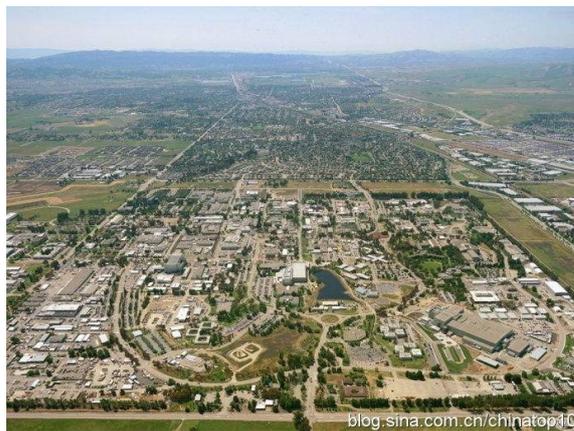


图5 NIF装置航拍图(右下角的建筑)



图6 NIF装置的激光实验与靶场区

NIF实验取得了巨大进展,诸多关键物理参数在不同发次达到或接近达到点火靶设计指标^⑥。但是,聚变点火相关的关键物理参数未能在同一发次达到设计目标,且部分指标低于预期。NIC计划结束后,人们继续在NIF装置上开展点火物理研究。

2. 我国相关领域研究

我国几乎在同一时期开始进行LICF研究。1964年王淦昌院士撰写了题为《利用大能量的光激光器产生中子的建议》的内部报告,文中提出利用激光打靶产生中子的实验想法^⑦。随后在邓锡铭院士领导下,中国科学院上海光学精密机械研究所开始研制高功率钕玻璃激光装置。1973年利用激光加热氘冰靶在实验室获得氘氘聚变中子^⑧。

中国工程物理研究院(简称中物院)是国家科研

计划单列的中国唯一的核武器研制生产单位,是以发展国防尖端科学技术为主的集理论、实验、设计、生产为一体的综合性研究院。高温高密度等离子体研究是其主要研究领域之一。20世纪70年代中期,中物院开始从理论、实验、诊断、制靶和驱动器五个方面,开展激光聚变研究工作。于敏先生曾于1978年撰写题为《关于激光巨变研究工作现状》的内部报告^⑧,系统地分析了当时国际激光聚变研究现状、讨论了主要研究问题和相关进展。中物院针对激光等离子体相互作用中的参量不稳定性 and 超热电子产生、辐射运输、内爆规律、高压状态方程等问题^{⑨⑩},开展理论、数值模拟、实验诊断测试方法等研究,为激光聚变研究奠定了良好的技术基础,储备了优秀的科技人才。

经过几十年的不断探索,我国已逐渐形成初具规模的激光聚变研究队伍,对激光聚变研究的战略意义有了深刻的认识。1988年12月,王淦昌、王大珩、于敏三位科学家联名致信中央,建议在国家高技术863计划中增设惯性约束聚变技术项目。1993年8月19日,国家高技术863计划惯性约束聚变技术专题正式成立。

我国激光聚变研究分为物理研究和驱动器研制两个主要方面,两者之间关联紧密,相互促进。随着激光聚变研究不断加深,我国在驱动器研制方面也得到了长足的发展,先后研制出一系列人们熟知的激光装置,其中包括神光系列和星光系列装置(表1)。这些装置的研发在我国激光聚变研究和相关前沿学科的发展中发挥了重要作用。

2000年位于上海的神光-II激光装置正式投入

使用,我国开始系统地开展三倍频条件下(波长351 nm)激光聚变主要物理过程的研究。在神光-II激光装置上,科学家们针对解决辐射不透明度^{⑪⑫}、等离子体均匀性等问题进行了一系列创新,实现了小尺寸黑腔、低入射激光能量下产生高辐射温度。六年后,神光-III原型激光装置投入使用,实现了黑腔辐射温度约230 eV,间接驱动内爆中子产额超过 10^{10} ,LICF的研究更加系统和深入。2015年神光-III主机激光装置全面投入使用,其黑腔峰值辐射温度达到280 eV,间接驱动内爆中子产额提高了两个数量级。在目前世界上已建成用于ICF研究的激光装置中,神光III主机激光装置的输出能量仅次于美国NIF装置。

四、国际和国内主要装置简介

在NIF实验影响下,英国、法国、俄罗斯、日本和中国等国家先后开始建设巨型激光设施。英国计划建造全球首座核聚变发电站,并计划在2030年左右将核聚变发电站产生的电力并入电网。英国研究理事会称“核聚变将在未来全球的能源体系中占据举足轻重的地位,英国不可以袖手旁观”。在法国兆焦激光器(LMJ)和欧盟超强激光构造计划(ELI)启动后,2012年俄罗斯宣布将建造世界上功率最大的激光装置。为了降低研制风险,我国ICF点火研究采取从万焦耳级到十万焦耳级,进而发展到百万焦耳级的渐进式方案,即在万焦耳级激光器研究基础上,进行激光能量20到40万焦耳神光III装置研究,随后外推到激光能量约为神光-III装置能量4到5倍的神光-IV激光装置上进行ICF研究

表1 我国高功率固体激光装置发展简表

建成时间	装置名称及地点	输出能量	光束数
1980年	六路激光装置(上海)	50J/1 ω /束	6
1985年	星光-I激光装置(绵阳)	30J/3 ω , 70J/1 ω	1
1986年	神光-I激光装置(上海)	1.6kJ/1 ω	2
1993年	星光-II激光装置(绵阳)	130J/3 ω , 250J/1 ω	1
2000年	神光-II激光装置(上海)	2kJ/3 ω , 6kJ/1 ω	8
2006年	神光-III原型装置(绵阳)	10kJ/3 ω	8
2015年	神光-III主机激光装置(绵阳)	180kJ/3 ω /3ns	48

和点火演示。本文将主要介绍美国NIF装置,中国神光-III主机激光装置和法国LMJ装置。

1. 美国NIF装置

如前文所述,NIF装置位于美国加利福尼亚州LLNL,是目前世界上最大、最复杂的ICF研究装置,主要用于在实验室条件下实现聚变点火的研究。图7给出NIF装置布局示意图。

NIF于2009年正式建成,耗资约35亿美元。它主要由两部分构成:一部分是高能量紫外激光器系统,主要激光元件包括光脉冲发生器、放大器、驱动放大器的脉冲驱动系统、光学开关、光学聚能器以及激光束控制系统。通过高能量紫外激光器系统将主振荡器产生的低功率激光脉冲修正、充分放大后,准确地聚焦在微型靶丸上。激光器系统的能量和功率分别为NOVA激光器的40倍和10倍,输出波长351 nm、总能量1.8 MJ的192束矩形激光。聚焦前每束激光边长约为40厘米。每4束激光组成一个束组,共48个束组。总输出脉宽为4 ps,功率为500亿瓦;另一部分是靶室,它由18块铝材外壳拼接而成,每块外壳厚度均约10厘米。靶室球体直径为10米、重量450吨,可容纳近百个诊断装置,系统运行时必须启动近六万个高科技装置。靶室内

安置一个放置靶丸的中空圆柱体(黑腔),圆柱体内外为金衬。靶室球体外壳上的正方形窗口为激光束入口,圆形窗口用来安装和调节诊断装置。

实验进行过程中,十亿分之一秒内192束激光束同时发射(误差不超过30 ps),聚焦在靶室内直径约为0.44 cm的DT靶丸上,使其发生聚变反应。此时温度可达到一亿度,压力超过一千亿个大气压。这一过程将持续足够长的时间,以便人们精确地测量核反应的温度、压力及其他特性、反应过程。

2. 中国神光-III主机激光装置

在神光-II(1986年)与神光-III原型装置(2006年)的研究和开发基础上,中物院激光聚变研究中心会同国内200多家单位协作,设计并搭建神光-III主机激光装置(SG-III)。该装置的设计总输出能量为180 kJ,峰值功率高达60 TW,2015年建成并进行第一次全功率打靶,输出能量181.3 kJ。在目前已建成用于ICF研究的激光装置中,神光-III主机激光装置的总体规模和性能位列亚洲之一、世界之二,仅次于美国NIF装置,已达到国际先进水平。

神光-III主机激光装置由前端、预放大、主放大、靶场、光束控制与参数测量、计算机集中控制六大系统组成。该装置的48束激光分为6个束组,每个束

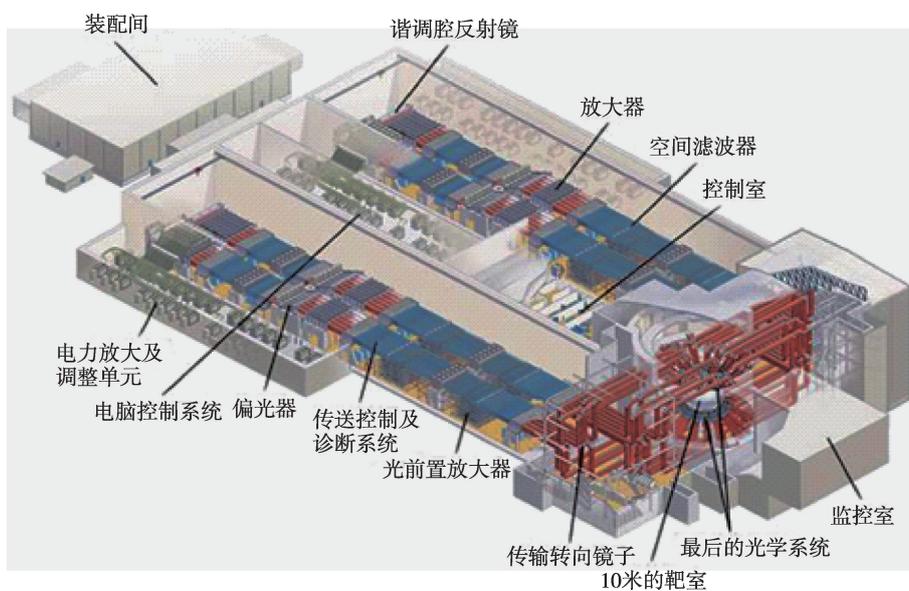


图7 NIF装置布局示意图(世界上最大的激光器:国家点火装置 <http://news.cyol.com>)



图8 正在安装的NIF装置靶室

组包含8束激光,按 4×2 阵列排布。(1)前端系统产生纳焦级的基频单脉冲(波长为1053 nm)后,经预放大系统放大到焦耳量级,并进行光束的空间整形。(2)整形后的激光脉冲进入主放大系统,被进一步放大到约7.5kJ/3ns。(3)靶场系统则用于实现48束激光的准直引导、频率转换、谐波分离和精确聚焦。通过实现靶的精确定位和靶面光强的精确控制,满足各类物理实验的技术要求。(4)光束控制与参数测量系统负责装置运行期间光束的准直和波前校正,完成激光参数的测量。(5)计算机集中控制系统用于实现主机装置各大系统之间的统筹控制和管理。神光-III装置可实现黑腔峰值辐射温度 $\sim 280\text{eV}$,间接驱动内爆中子产额 10^{12} ,约为神光-III原型装置的

100倍。

3. 法国LMJ装置

法国兆焦耳激光装置(LMJ)是欧洲最强的激光器。1996年6月,法国与美国签署一项加强两国核合作的协议,美国同意与法国共享超级计算机模拟核试验所获得的数据,并帮助法国建造LMJ,为高能密度物理研究提供实验能力,进而为法国核武器的安全和可靠性提供保证。LMJ由法国原子能委员会(CEA)军事应用局设计,其方案与美国NIF装置类似,设计总输出能量为1.8 MJ。其种子脉冲激光波长为1053 nm,输出能量在纳焦量级,脉宽在纳秒量级。通过钽玻璃构成的预放大器,输出能量达到焦耳量级。分束后的激光注入到由更大口径钽玻璃构成的主放大器。LMJ由240束激光组成,每8束激光构成一个束组,共30个束组。与美国NIF装置一样,LMJ采用四程放大技术,将输入能量放大约2万倍。由于受到资金的制约,截止2016年LMJ仅完成两个束组的建设。

五、总结

激光惯性约束聚变被认为是人类工程物理科技领域的顶峰,这不仅是因为其实现技术难度极高,更因为其研究具有重大的科学意义。通过可控核聚变解决能源问题固然是激光聚变的研究目的

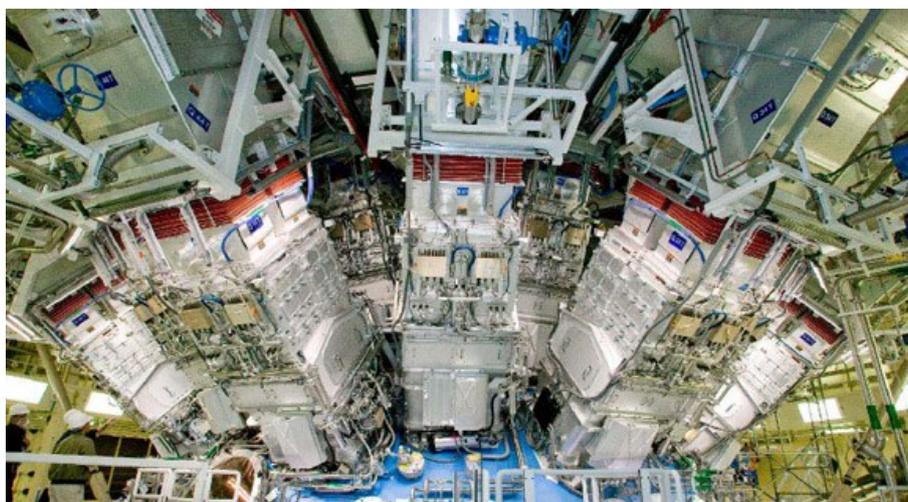


图9 布满终端光学组件的NIF装置靶室

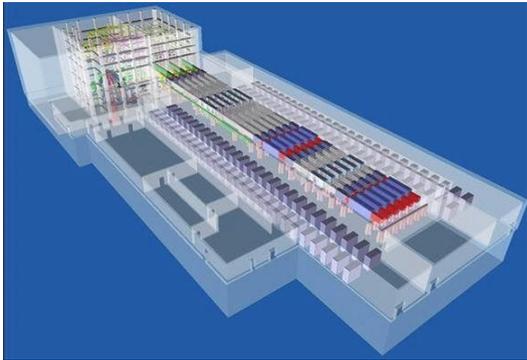


图10 神光-III装置布局示意图



图12 神光-III装置激光大厅靶室



图11 神光-III装置激光大厅

之一,但其应用领域却显然不仅限于此。回顾激光诞生以来ICF五十多年发展历程,无论从国家战略需求还是学科发展角度,ICF已成为非常重要的研究领域和学科方向。

LICF具有重要的军事应用价值。人们可以通过对核爆模拟的建模和模拟程序的验证,复制微型

核爆炸,对核武库进行评估和认证,确保在禁试条件下核武器的安全性和可靠性。相比其他技术途径,惯性约束装置更容易实现小型化,且开、关火控制性能较好,其在大型装备如航空母舰甚至宇宙飞船中的能源方面具有巨大的应用前景。

LICF研究可以促进前沿学科发展。间接驱动方式是高能物理研究的重要平台。其产生极强的辐射源,可以为等离子体物理研究提供特有的实验条件,帮助人们在实验室条件下研究激光等离子体相互作用、强辐射与物质(尤其是等离子体)相互作用、高温高密度物质的结构和特性等重要科学问题。与此同时,正由于LICF的工程实现难度极高,在其实现过程中不断整合各相关研究领域的力量,对机械、材料、光学、核物理等学科的发展起到了极大的推动作用。



图13 LMJ装置建设现场

参考文献

- ① N. G. Basov, O. N. Krohkin, JEPT 19, 123(1964)
- ② 杨显俊、李璐璐,磁惯性约束聚变:通向聚变能源的新途径,《中国科学:物理学 力学 天文学》46, 115202(2016)
- ③ N. Ding, X. D. Zhang, et al., Matter Radiat at Extremes 1, 135(2016)
- ④ S. Kawata, T. Karino, A. I. Ogoyski, Matter Radiat at Extremes 1, 89(2016)
- ⑤ J. Lindl, Phys. Plasmas 2, 3933(1995)
- ⑥ J. Lindl, P. Amendt, et al., Phys. Plasmas 11, 339(2004)
- ⑦ J. Lindl, O. Landen, et al., Phys. Plasmas 21, 020501(2014)
- ⑧ X. T. He et al., Phys. Plasmas 23, 082706(2016)
- ⑨ R. E. Kiddel, LRL Laser Research Program COTM-63-7(1963)
- ⑩ J. M. Dason, Phys. Fluids 7, 981(1964)
- ⑪ J. Nuckolls, L. Wood, A. Thioseen, G. Zimmerman, Nature 239, 139(1972)
- ⑫ M. S. Chu, Phys. Fluids 15, 413(1972)
- ⑬ K. A. Bruechner, S. Jorna, Rev. Mod. Phys. 46, 325(1974)
- ⑭ J. D. Lindl, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, COPD 76-106(1976)
- ⑮ M. J. Edwards, P. K. Patel, J. D. Lindl, et al., Phys. Plasmas 20, 070501(2013)
- ⑯ 王淦昌,“利用大能量大功率的光激光器产生中子的建议”,内部通信(1964)
- ⑰ 林尊琪,激光核聚变的发展,《中国激光》37, 2202(2010)
- ⑱ 于敏,关于激光聚变研究工作现状,研究报告(1978)
- ⑲ 吴思忠(导师:朱少平、周沧涛),《超强激光固体密度靶相互作用产生的快电子传输过程中的准直和能量沉积研究》,《中国工程物理研究院博士论文》(2009)
- ⑳ 康润国(导师:朱少平、裴文兵),《间接驱动激光聚变内爆物理若干问题研究》,《中国工程物理研究院博士论文》(2016)
- ㉑ 萝莉(导师:张彬),《ICF高功率激光驱动器中受激拉曼散射效应研究》,《四川大学硕士论文》(2005)
- ㉒ 许琰、赖东显、李双贵、冯庭桂、蓝可等,《中国科学G辑》34, 1(2004)
- ㉓ Y. Xu, J. Y. Zhang, J. M. Yang, W. B. Pei, et al., Phys. Plasmas 14, 052701(2007)
- ㉔ 国家自然科学基金委员会,自然科学学科发展战略调研报告:等离子体物理学,科学出版社(1994)



她用物理的情趣,引我们科苑揽胜; 她用知识的力量,助我们奋起攀登!

欢迎投稿,欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会,由中国科学院高能物理研究所主办,是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平,欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn,并将联系人姓名、详细地址、邮政编码,以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用,作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有,并签署《现代物理知识》版权转让协议书(全部作者签名),如不接受此协议,请在投稿时予以声明。来稿一经发表,将一次性酌情付酬,以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科

技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔和科苑快讯等栏目。

2019年《现代物理知识》每期定价10元,全年6期60元,欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号:2-824。

编辑部订阅(请通过银行转账到以下账号,并在附言中说明“现代物理知识**年**期”)

银行账号信息

名称:中国科学院高能物理研究所

开户行:工商银行北京永定路支行

账号:0200004909014451557

需要过去杂志的读者,请按下列价格转账。

2010~2018年单行本每期10元;2010~2015年合订本每本60元。