

## 激光惯性约束聚变靶制备技术研究进展\*

高莎莎, 吴小军, 何智兵, 何小珊, 王涛, 朱方华, 张占文

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 在实验室实现聚变反应释放的能量大于点燃聚变反应所需能量的阈值是当今世界 ICF 研究的主要目标, 实现这一目标仍需要深入研究一系列的关键物理问题。在 ICF 研究中, 制靶能力的发展与提升至至关重要, 靶的质量是实验成功的核心要素之一。本文介绍了国际 ICF 靶制备工作近年来在新型烧蚀层材料靶丸、新型靶丸支撑技术、优化黑腔材料与构型以及减小燃料填充管直径等方面取得的一系列进展, 并结合 ICF 物理需求, 简要阐述了 ICF 靶的发展趋势。

**关键词:** 惯性约束聚变; 靶; 制备; 进展; 发展

中图分类号: O532

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.200039

## Research progress of fabrication techniques for laser inertial confinement fusion target

Gao Shasha, Wu Xiaojun, He Zhibing, He Xiaoshan, Wang Tao, Zhu Fanghua, Zhang Zhanwen

(Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-987, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The main goal of inertial confinement fusion (ICF) research is to realize that the energy released by fusion reaction is greater than the threshold value of ignition fusion reaction in the laboratory. A series of key physical problems must be explored deeply for the purpose. In ICF, the capability of target fabrication is particularly important, and the quality of target is the pivotal element of physical experiment. This paper expounds the progress of ICF target preparation in recent years, such as capsule of new ablation material, new technology of capsule support, new material and shape of hohlraums, and reduction of filler tube dimensions. Combining with the physical requirements of ICF, it introduces the development trend of ICF target briefly.

**Key words:** laser inertial confinement fusion; target; fabrication; progress; development

激光惯性约束聚变(ICF)是利用激光或激光产生的 X 射线作驱动源, 均匀地作用于微型球状靶丸外壳表面, 形成高温高压等离子体, 并向外喷射, 产生反冲压力, 驱动装填氘氚燃料的靶丸快速压缩, 使压缩聚变燃料层到极高密度, 并使靶丸中心附近小部分燃料等离子体达到极高的温度形成热核聚变热斑, 同时使热斑以外的燃料达到极高的密度(约  $1 \text{ kg/cm}^3$ ), 在热核燃料飞散之前进行充分的热核燃烧释放大量能量, 从而获取聚变能量增益。目前, 利用激光驱动惯性约束聚变的途径主要有两种方式: 直接驱动与间接驱动, 如图 1 所示, 前者采用入射激光直接照射靶丸, 后者是将入射激光辐照到黑腔内壁, 利用部分激光能量转换成的 X 射线作为驱动源, 烧蚀靶丸外表面, 驱

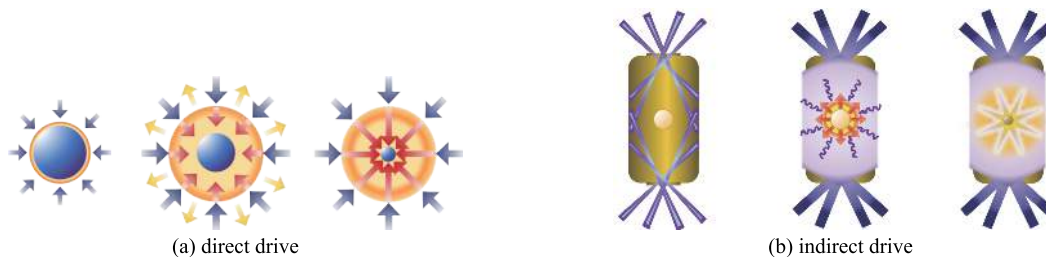


Fig. 1 Two drive modes of ICF

图 1 两种 ICF 驱动方式

\* 收稿日期: 2020-01-01; 修订日期: 2020-02-24

基金项目: 科学挑战专题资助项目(TZ2018006)

作者简介: 高莎莎(1987—), 女, 硕士, 从事激光聚变靶制备技术研究; kindly33@163.com。

通信作者: 何智兵(1976—), 男, 博士, 研究员, 从事激光聚变靶制备技术研究; He\_zhibing@126.com。

动装填氘燃料的靶丸压缩。

在实验室实现聚变反应释放的能量大于点燃聚变反应所需能量的阈值是当今世界 ICF 研究的主要目标,是 ICF 能否作为聚变能源的决定因素。为了实现这一目标,从 20 世纪 60 年代开始,美国、法国、俄罗斯、日本和中国等许多国家投入了巨大的人力物力财力,开展了大量的工作。而在 2012 年 9 月,美国作为世界上第一个尝试实现该目标的国家,暂停了为期两年的攻关计划(National Ignition Campaign, NIC),未能实现这一具有巨大科学挑战的目标。经过评估发现,实现这一目标仍需要深入研究以下关键物理问题:激光等离子体相互作用、黑腔能量学、动能向热斑热能转化率、烧蚀层材料与燃料的混合等。

激光惯性约束聚变(ICF)是集物理、实验、诊断、制靶、驱动器的大科学工程<sup>[1]</sup>,涉及多学科交叉融合,多研究体系建设。靶是激光聚变物理思想的具体体现和实验研究的物质基础。可靠的制靶及其相关的科学技术研发能力对 ICF 研究至关重要,制靶质量是影响 ICF 发展的核心要素之一。图 2 展示了美国为实现 ICF 研究目标采用的典型靶型<sup>[2]</sup>,该靶主要由黑腔、靶丸、燃料层、燃料填充管、靶丸支撑膜以及热机械组件(TMP)等组成,是 ICF 靶材料种类多、尺寸跨度大、要求精度高、结构复杂化等特点的集中体现。

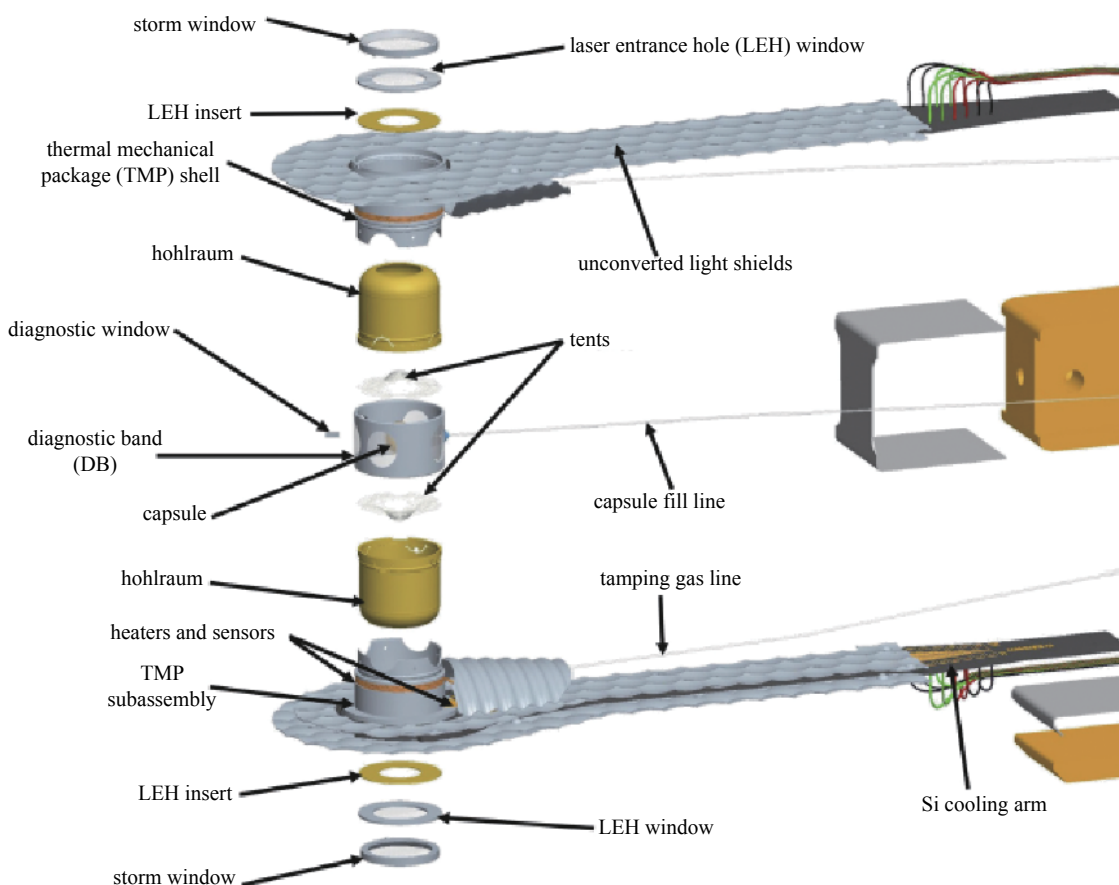


Fig. 2 Expanded view of the National Ignition Facility(NIF) target

图 2 美国国家点火装置采用的靶型爆炸图

针对 ICF 研究面临的主要问题,目前靶材料与制备技术研究的重点发展方向涉及研制新型烧蚀层材料,开发物理性能更优的新型烧蚀层材料靶丸;优化靶丸支撑方式,发展能消除或减少支撑膜对物理过程扰动的新型靶丸支撑技术;优化黑腔材料与构型,发展改善驱动不对称性的泡沫内衬等新构型黑腔制备技术;减小燃料填充管直径,开发减弱对物理过程影响的燃料填充管等。本文系统介绍了国际 ICF 靶制备工作近年来取得的一系列进展,并根据目前 ICF 靶材料与制备技术的发展情况,结合 ICF 物理需求,阐述了 ICF 靶的发展趋势。

## 1 新型烧蚀层材料靶丸

靶丸是承装聚变燃料的空心微球,直径在数百  $\mu\text{m}$  至数  $\text{mm}$  之间,是 ICF 靶的核心部件之一,其品质将直接影响物理过程的效率。在目前的 ICF 研究中,靶丸烧蚀层材料主要有碳氢(CH)、高密度碳(HDC)以及铍(Be)等,并通过改变掺杂成分以及浓度来改善靶丸内爆的流体力学不稳定性<sup>[3-10]</sup>,如图 3 所示。

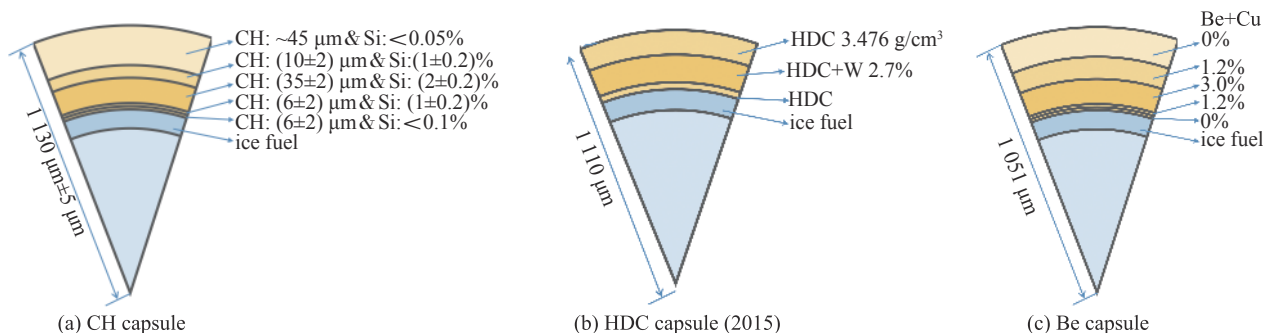


Fig. 3 Capsule design for NIF

图3 NIF靶丸设计

## 1.1 CH靶丸

由于CH靶丸具有纯度高、结构致密且表面光洁度高等特点，NIF一直致力于CH靶丸的制备，其直径约为 $\phi 2.26$  mm，烧蚀层厚度约为195  $\mu\text{m}$ ，表面粗糙度10 nm级别，对靶丸尺寸精度以及梯度掺杂Si的精度控制要求如图3(a)所示。CH靶丸是以微流控技术制备的聚 $\alpha$ 甲基苯乙烯(PAMS)微球为芯轴，采用低压等离子体聚合技术在其表面进行掺杂的辉光放电CH聚合物(GDP)涂层制备，然后通过高温热降解去除PAMS芯轴，获得掺杂的GDP球壳，如图4所示<sup>[11]</sup>。GDP是一种理想的靶丸烧蚀层材料，具有非晶态、低Z、易于掺杂高Z元素、热性能与机械性能好等特点<sup>[12]</sup>。美国等制靶团队对此开展了大量的研究工作，并取得了显著的成果。目前，GDP壳层壁厚控制精度达到 $\pm 3$   $\mu\text{m}$ ，掺杂层厚度控制精度达到 $\pm 2$   $\mu\text{m}$ ，表面粗糙度十nm级别，实现了Si、Ge等元素的掺杂<sup>[13-14]</sup>，掺杂浓度控制精度达到 $\pm 0.2\%$ （原子分数）。

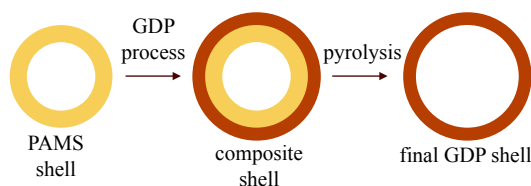


Fig. 4 Schematics of GDP shells fabrication

图4 GDP球壳制备过程示意图

然而，GDP在制备过程中会产生自由基，使得GDP壳层在光照条件下产生光电子缺陷位而发生光致氧化，导致GDP组分结构不稳定。尽管物理设计已经对壳层中的氧含量提出了要求（ $< 0.5\%$ 原子分数），但是物理人员发现CH烧蚀层的氧化将会造成物理实验中短波长不透明度以及密度调制等问题，因而对烧蚀层中的氧分布的均匀性提出了更高的要求。近几年，LLNL和通用原子公司(General Atomics, GA)的科研人员尝试采用二次离子质谱法(SIMS)、能量色散谱(EDS)、傅里叶变换红外吸收法(FTIR)等方法对GDP氧调制样品中氧含量的二维分布开展研究<sup>[15-16]</sup>，但是目前，要实现极少量氧分布的精密控制，并进行三维分布定量、无损表征仍是GDP壳层制备技术的一大难题。

鉴于此，ICF研究团队需要寻求一种化学稳定性更优的CH烧蚀层材料，LLNL的研究人员开发了利用引发式化学气相沉积(initiated Chemical Vapor Deposition, iCVD)技术制备的PDVB(聚二乙烯基苯)材料<sup>[17-19]</sup>。iCVD技术是基于高分子液相自由基聚合的原理，利用活泼的引发剂在较低的能量诱导下分解初级自由基，使初级自由基与反应单体吸附在基底表面进行原位聚合，最终形成高分子薄膜。iCVD技术制备的PDVB具有优良的力学性能、光学透明性、光稳定性、化学稳定性与热稳定性。同时，研究人员对PDVB作为靶丸烧蚀层材料应用的应力、掺杂等问题开展了研究，并成功制备了直径为1 mm的透明球壳，并实现了高Z掺杂(Si:  $< 1\%$ 原子分数)的PDVB壳层的制备，如图5所示。基于以上的优异的性能，iCVD-PDVB有望作为ICF研究靶丸烧蚀层候选材料，更加深入与细致的研究正在进行中。

## 1.2 HDC靶丸

根据模拟计算与物理实验结果，HDC靶丸具有极高的导热率与屈服强度、出色的辐射不透明性、高的能量吸收效率及燃烧效率、大带宽光学透过率以及对支撑膜干扰的不敏感性，使得HDC靶丸能获得比CH(GDP)靶丸更优异的物理性能<sup>[20-23]</sup>。物理设计对HDC靶丸的球形度、表面粗糙度、杂质含量等要求苛刻，除此之外，还对HDC涂层的密度、晶粒尺度等提出了严格要求。HDC靶丸的制备过程如图6所示<sup>[24]</sup>，



Fig. 5 Si-PDVB fabricated by iCVD technology

图5 iCVD技术制备的Si-PDVB

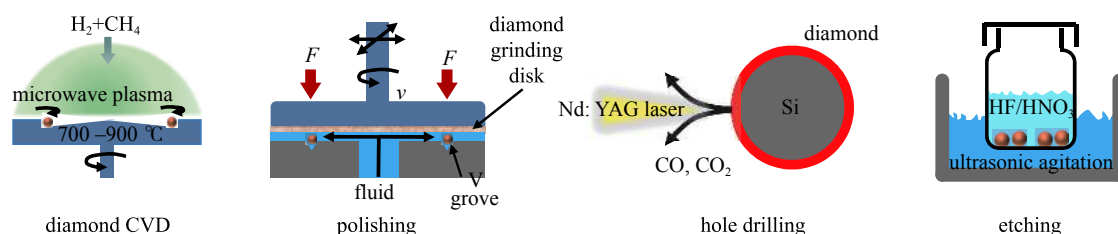


Fig. 6 Schematics of HDC capsules fabrication

图6 HDC靶丸制备过程示意图

首先采用微波等离子体化学气相沉积技术在Si微球芯轴表面制备HDC涂层,再对HDC微球表面进行抛光,达到10 nm级的表面粗糙度<sup>[10]</sup>,然后利用激光加工技术对HDC涂层进行打孔,孔径5~10 μm,最后在HF/HNO<sub>3</sub>溶液中通过超声波辅助去除芯轴,获得HDC靶丸。

德国弗朗禾费(Fraunhofer, IAF)研究所于2005年实现了NIC用高质量金刚石靶丸制备,并陆续展开了梯度掺杂(W, Ta)的研究。日本激光工程研究所的Hiroki Kato等人<sup>[25]</sup>,利用热丝化学气相沉积(Hot Filament Chemical Vapor Deposition, HFCVD)技术制备了直径约500 μm,壁厚<10 μm,表面粗糙度优于100 nm的HDC靶丸。LLNL与GA制靶技术团队针对HDC烧蚀层晶粒尺寸问题,通过改变HDC沉积过程中的工艺参数和钨掺杂含量(1%左右),实现了HDC靶丸表面晶粒尺寸由十几μm降低至小于100 nm的水平,并在NIF上进行首批物理实验。但是,HDC靶丸的制备仍有许多亟需解决的问题,如:在保证靶丸涂层质量密度的同时实现靶丸全厚度的纳米级晶粒细化;实现高精度小批量超硬微小球体的抛光;实现掺杂浓度精确控制等。尽管美国、德国、日本、中国等国家已开展了大量研究<sup>[23-27]</sup>,目前HDC靶丸仍未全面达到物理设计指标,仍需进行大量研发解决上述问题。

### 1.3 Be靶丸

相比于CH烧蚀层,铍(Be)作为备选烧蚀层材料具有较低的不透明度和较高的质量密度,可以提高物理过程能量耦合效率,降低烧蚀前端的不稳定性增长,是更优异的烧蚀层材料<sup>[28-29]</sup>。Be靶丸通常采用多个靶枪磁控溅射技术在球形芯轴上制备梯度掺杂的Be涂层,再对Be微球表面进行抛光,达到10 nm级的表面粗糙度,然后利用激光加工技术对Be涂层进行打孔,最后通过热降解去除芯轴。

经过大量研究<sup>[30-36]</sup>,国际制靶团队在Be涂层镀制、抛光、芯轴去除等方面取得了一系列进展,可制备外径范围为440~2 000 μm,壁厚范围为5~160 μm的Be靶丸,5 μm厚的Be靶丸的外表面粗糙度RMS优于50 nm;并利用滚筒抛光技术实现了Be靶丸外表面粗糙度优于15 nm(如图7所示);通过改变Cu溅射枪的功率对涂层中的径向Cu浓度进行精确控制,S. Bhandarkar等人对GDP芯轴、PAMS芯轴、Si芯轴以及Ni芯轴的去除对Be涂层的影响进行了详细研究。

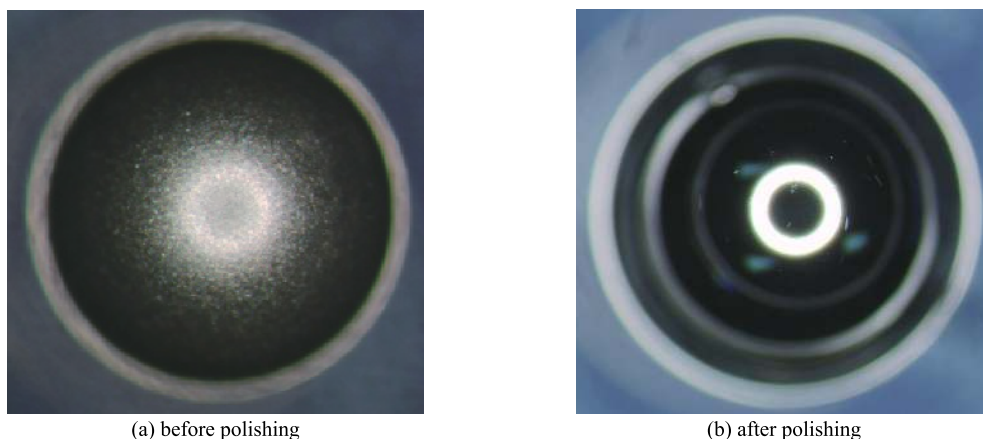


Fig. 7 Be capsule for tumble polishing

图7 滚筒抛光前后的Be靶丸

目前Be靶丸制备的主要难点在于实现0.35%~3.00%(原子分数)范围的低浓度Cu掺杂的精确控制;解决靶丸芯轴热降解时Cu的界面扩散;降低Be靶材纯度不高引起的高Z杂质元素含量;降低Be涂层残余应力,提高涂层厚度均匀性等方面,尤其是针对Be(Cu)靶丸的微观结构,由于晶粒形态、尺寸和取向分布等将直接影响涂层的力

学性能和烧蚀特性,如何获得晶粒细化或者非晶化的 Be 靶丸,已成为 ICF 制靶领域研究的热点。

## 2 靶丸支撑技术

为了实现靶丸压缩过程的对称性,物理设计要求靶丸须在黑腔中心实现高精度定位,传统的方式是采用具有良好力学性能的低 Z 低密度聚合物薄膜将靶丸固定。在早期,NIF 采用的靶丸支撑膜厚度为 300 nm<sup>[37]</sup>,经过大量研究发现靶丸支撑膜的存在会影响高收缩比物理过程的性能,支撑膜的扰动严重破坏了热斑对称性<sup>[37-41]</sup>。消除或减小支撑膜扰动的重要途径包括采用更薄的支撑膜以及探索新型靶丸支撑技术。

### 2.1 传统薄膜支撑

目前,聚乙烯醇缩甲醛(Formvar)由于其优异的力学性能(断裂伸长率 50%,拉伸强度 42~59 MPa)和易制备性被选为 NIF 用靶型的支撑膜基准材料<sup>[42-43]</sup>。经过长期的研究,美国已成功制备了厚度在几 nm~几百 nm 范围内可调的 Formvar 膜,其结构与性能稳定,对环境紫外线、温度、氧气等不敏感。根据物理模拟计算与前期实验结果,需要将支撑膜厚度尽可能减小<sup>[36]</sup>,并减小支撑膜与靶丸的接触角度(图 8 中 contact angle)与接触半径(图 8 中 contact radius),来减弱靶

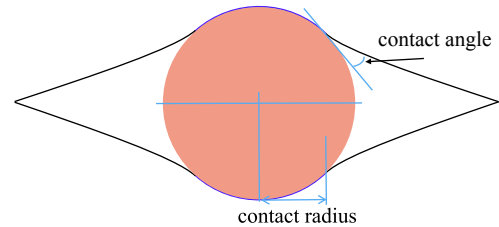


Fig. 8 Schematics of ultra-thin tents

图 8 薄膜支撑示意图

丸支撑膜对物理过程的干扰。由于薄膜厚度的变化将影响其力学性能,目前,厚度为十几 nm 的高分子量 Formvar 膜尚无法满足靶丸的高精度定位要求。为了获取力学性能更佳的支撑膜,研究人员开发了超高分子量的聚乙烯醇缩甲醛,相关的力学性能与靶丸支撑能力测试正在进一步研究中。此外,Formvar 膜易受湿度、温度的影响,随着温度的降低,其失效方式由室温状态下的剪切屈服转变为裂纹的生成扩展,失效应急剧减小,极大的影响了 Formvar 膜对靶丸的定位能力,使得 Formvar 膜低温靶的应用受到了限制。

因此,国际制靶团队仍在减小支撑膜厚度、优化支撑膜性能方面投入大量精力,致力于开发适用于靶丸支撑的超薄超高强度薄膜。

### 2.2 新型靶丸支撑技术

同时,国际制靶团队还发展了多种新型靶丸支撑技术<sup>[40]</sup>,如两极接触支撑技术(图 9(a))、四边形纳米丝支撑技术(图 9(b))、靶丸磁悬浮技术等。

两极接触支撑技术<sup>[44]</sup>采用 Hammel 等人制备的一种新型支撑膜,该膜由一层厚度为 43 nm 的聚酰亚胺箔和一层厚度为 8 nm(密度为 1.8~2.0 g/cm<sup>3</sup>)的碳镀膜组成,有效的减小了靶丸与支撑膜之间的接触半径,将接触半径从传统支撑膜方案中的 700~800 μm 减小到了约 200 μm。NIF 研究人员利用低温物理实验对两极接触支撑方案进行了模拟计算,结果表明相比于传统支撑膜的实验,采用两极接触支撑的物理实验的中子产额增加了 70%。但是,此种支撑方式需要将黑腔分为四个部分,大大增加了靶的制备与装配难度。

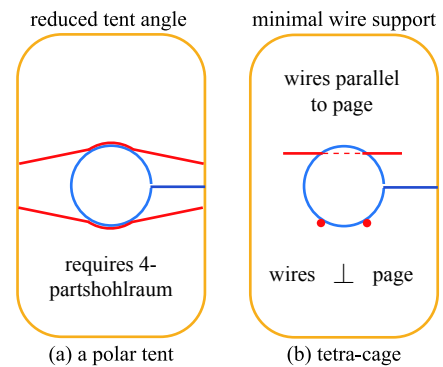


Fig. 9 Schematics of supported capsules

图 9 靶丸支撑方式示意图

四边形纳米丝支撑设计极大程度上减少了靶丸与支撑结构的接触,是目前最有望取代传统膜支撑的新型支撑技术。四边形丝支撑方案采用 4 根细丝取代了支撑膜,降低与靶丸的接触面积,靶丸顶部与底部分别由两根平行丝线提供支撑,两组丝线在空间上呈相互垂直状态,如图 10 所示。根据物理实验结果,相比与传统的 45 nm 厚度支撑膜的方案,四边形丝支撑可将靶丸的影响面积降低 80%。LLNL 与 GA 制靶研发团队将此项技术作为研发重点,尝试了多种用于丝支撑的纳米丝材料,如 PE 丝、蜘蛛丝、碳丝等,并研制开发了满足尺寸和靶丸支撑要求的基于碳纳米管(CNT)纳米丝,在尽可能减小支撑丝的直径的同时,达到了对靶丸的支撑与定位作用,并且具有很好的稳定性。但是,对于使用条件更为苛刻的低温靶,四边形丝支撑技术面临着靶丸位置的偏移、CNT 微丝的失效等挑战。

尽管超薄薄膜以及微丝支撑已经在一定程度上减小了对物理过程的影响,但是最理想的支撑方式是不借助额外的支撑结构将靶丸悬浮起来,磁悬浮技术将有望实现这一目标,如图 11 所示。这种技术是利用黑腔外面设置的

多个超导线圈产生外部磁场阱将表面镀有超导外层的靶丸悬浮在黑腔中并进行精确的定位,在概念上非常简单,但要实现靶丸的稳定悬浮在技术上面面临着极大的挑战。LLNL、通用原子公司(GA)以及我国的制靶技术研究人員均已开展了相关的研究工作<sup>[45-55]</sup>。磁悬浮技术的实现需要在靶丸外表面镀制超薄( $<100\text{ nm}$ )的超导涂层,超导涂层的选择与开发是首要解决的问题,Baker等<sup>[54]</sup>认为 $\text{MgB}_2$ 是可能作为靶丸表面超导涂层的材料之一。目前,这项技术才刚起步,正在进行该概念的研发和测试,将会是国际制靶发展的一项长期计划。

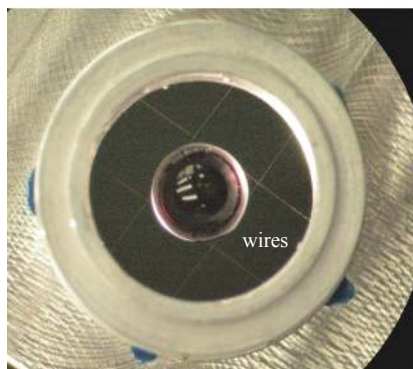


Fig. 10 Assembly of "tetra-cage"

图 10 四边形纳米丝支撑装配实物图



Fig. 11 Schematics of the superconducting magnetic levitation to support capsule

图 11 磁悬浮靶丸示意图

### 3 优化黑腔材料与构型

ICF 物理设计中,黑腔的作用是将入射激光转换为热 X 射线源,是 ICF 靶的另一核心部件,目前采用的柱形黑腔中,由激光等离子体相互作用(LPI)主导的随时间变化的驱动不对称性会妨碍向热斑的有效能量传输<sup>[56-60]</sup>。为了改善柱形黑腔驱动不对称性,NIF 探索了多种不同几何学构型的新型黑腔设计,例如图 12 中的橄榄型腔(rugby-shaped)<sup>[61-65]</sup>、I 型腔(I-raum)<sup>[66]</sup>、对锥形黑腔(Frustrum)<sup>[67]</sup>,并通过物理实验证实,在黑腔内采用低密度泡沫内衬层<sup>[68]</sup>,可以有效的控制黑腔壁移动,改善柱形黑腔驱动不对称性。

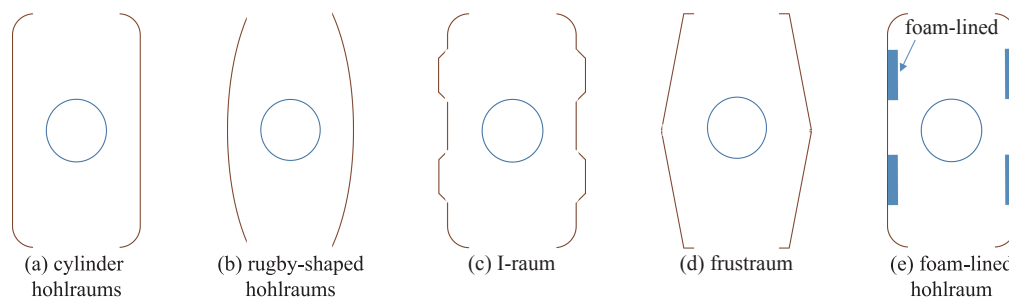


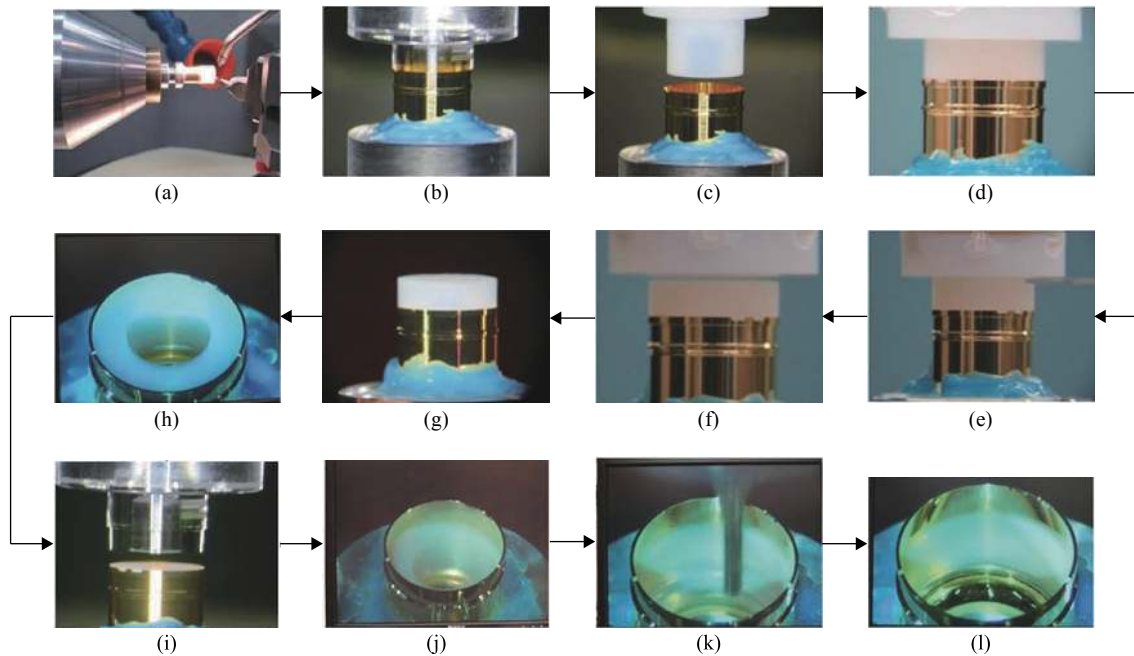
Fig. 12 New designs of the NIF hohlraums

图 12 NIF 的新型黑腔设计

对于现阶段国际制靶技术而言,以上几种单纯改变构型的黑腔制备已不是难题,而泡沫内衬的新构型黑腔制靶技术带来了极大的挑战。泡沫材料的制备方法已发展得十分成熟,但是,根据物理设计的要求,黑腔用泡沫内衬材料需要满足高 Z 或者中 Z 材料,泡沫密度 $\sim 30\text{ mg/cm}^3$ ,厚度 $\sim 250\text{ }\mu\text{m}$ ,均匀的、贯通的纳米级孔隙等苛刻的条件,同时还要具备满足后续精密加工、装配等过程的结构强度,其制备难度非常大。因此,开发适用于黑腔内衬的新型泡沫材料,发展与之配套的精密加工、装配技术成为制靶技术的一个重要发展方向。

Suhas Bhandarkar 等人<sup>[68]</sup>采用传统溶胶凝胶法制备了 $90\text{ mg/cm}^3$ 的 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 气凝胶,并利用精密加工与装配技术获得了 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 气凝胶内衬的黑腔样品,具体过程如图 13 所示。然而,对 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 气凝胶进行二次加工的方法,会造成大量的碎屑,并且限制了可用的泡沫内衬密度,对于 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 泡沫,可加工的密度最小约为 $50\text{ mg/cm}^3$ ,远未达到物理设计的要求。

因此,为了减少黑腔内的泡沫碎屑,进一步降低泡沫内衬密度,Suhas Bhandarkar 等人<sup>[68]</sup>利用 $355\text{ nm}$ 纳秒激光器加工制备在金环中的泡沫,成功制备了密度为 $20\text{ mg/cm}^3$ 的 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 泡沫金(Au)环,经过一系列的工艺改进,目前



(a) preparatory machining of foam into a cylindrical billet with the starting hole in the center on a lathe; (b) potting of the hohlraum onto a post using a removable adhesive; (c) aligning the billet machined in (a) to the potted hohlraum; (d) partial insertion of the billet into the hohlraum; (e) side view of the cutting of the foam billet using a spinning wire; (f) separation of the billet from its holder upon completion of the cutting; (g) side of the foam in the hohlraum ready for further insertion; (h) top view of the billet flush with the hohlraum waist; (i) customized pusher readying for insertion of the billet to the right location within the hohlraum; (j) billet in its final resting place inside the hohlraum; (k) milling of the inner wall of the billet to achieve the right liner thickness; (l) final part.

Fig. 13 Progression of the steps for machining a  $Ta_2O_5$  foam liner

图 13  $Ta_2O_5$  气凝胶内衬的黑腔样品加工与装配过程

黑腔用泡沫内衬密度从  $90 \text{ mg/cm}^3$  降低至  $10 \text{ mg/cm}^3$ , 泡沫内衬宽度从  $200 \mu\text{m}$  增大到  $500 \mu\text{m}$ , 并进一步减小了厚度。然而, 由于泡沫金环的结构强度问题, 大大增加了后续与黑腔套装的装配难度。

为了提高泡沫环的强度, Corie Horwood 等人<sup>[69]</sup> 利用电镀铂 (Pt) 代替 Au 作为支撑层, 采用去合金化技术成功制备了密度为  $29 \text{ mg/cm}^3$  的  $Ta_2O_5$  泡沫环。在铜芯轴上电镀厚度为  $100 \sim 200 \mu\text{m}$  的  $70\%Ag-30\%Au$  合金, 在退火处理后的 Ag-Au 合金涂层上电镀厚度超过  $30 \mu\text{m}$  的 Pt, 通过调整电镀过程参数, 获得了密实的、稳定的、结合力好的 Pt 涂层, 利用加工技术, 将 Pt 减薄至需要的厚度, 之后, 铜芯轴与 Ag 分别通过化学腐蚀的方法去除, 获得由 Pt 支撑的 Au 纳米多孔结构 (NanoPorous Gold, NPG) 材料。然后将 NPG 作为模板, 采用原子层沉积 (ALD) 技术沉积需要的泡沫材料, 如  $TaO_2$ ,  $Ta_2O_5$ ,  $ZnO$ ,  $Al_2O_3$  等, 最后将模板中的 Au 去除, 获得 Pt 支撑的泡沫环。此种方法制备的 Pt 支撑泡沫环具有良好的力学性能, 一定程度上降低了后续泡沫环与黑腔的套装难度。同时, LLNL 制靶研究人员还尝试利用增材制造技术制备模板, 结合 ALD 技术获得了黑腔用极低密度泡沫内衬。

#### 4 减小燃料填充管直径

低温靶是指在极低的温度下, 靶丸内壁形成均匀的固体或液体聚变燃料的靶型。在相同的激光能量条件下, 由于低温靶具有较高的初始燃料密度和较低的冲击波预热灵敏特性, 相比气体靶, 更易达到高密度压缩。因此, 低温靶已成为国际上实现 ICF 研究目标的首选靶型。

向靶丸中充入燃料气体并进行冷冻是低温靶制备中的关键环节。目前在美国 NIF 上进行的低温靶系列实验均采用燃料填充管将燃料气体充入靶丸内, 并实现燃料的冷冻。然而, 燃料填充管对物理过程对称性产生了明显的影响<sup>[70-73]</sup>, 要获得更好的物理过程, 需要进一步减小燃料填充管的尖端直径, 经过物理实验与理论计算, 直径为  $5 \mu\text{m}$  的燃料填充管设计, 对三种烧蚀层靶丸性能的影响减小至物理可接受的范围<sup>[74]</sup>。

燃料填充管通常采用石英或聚合物拉制而成, 更细的燃料填充管将会对制靶带来一系列挑战, 包括能否实现数  $\mu\text{m}$  直径的燃料充气管的可控制备, 其力学性能能否满足靶在装配、运输等过程中的强度要求; 能否在有限的时间内完成燃料填充等涉及微管制备、精密装配、燃料填充的诸多问题, 美国 LLNL, GA 以及我国在内的制靶技术团队在此方面做出了极大的努力。

2019年4月,在美国举办的23届制靶会(Target Fabrication Specialist Meeting)上,GA报道<sup>[75]</sup>了将燃料填充管从 $10\ \mu\text{m}$ , $5\ \mu\text{m}$ 减小至 $2\ \mu\text{m}$ 的显著进展,研究人员成功制备了尖端直径为 $2\ \mu\text{m}$ 的微管,并利用 $532\ \text{nm}$ 绿光激光器以及压力循环浸出工艺解决了微孔加工与芯轴去除的难题,图14展示了直径约 $2.5\ \mu\text{m}$ 的燃料填充管与靶丸的管球组件(Capsule Fill Tube Assembly, CFTA)。但是数 $\mu\text{m}$ 直径燃料填充管的制备一致性与结构强度仍需要进一步的研究。

## 5 结 论

尽管实现ICF研究目标是一项巨大的科学挑战,但ICF研究团队仍然坚持不懈。靶的质量是ICF实验成功的核心要素之一,制靶技术的发展与能力的提升对实现ICF研究目标至关重要。美国GA, LLNL、洛斯·阿拉莫斯国家实验室(LANL)、圣地亚国家实验室(SNL)、罗切斯特大学激光能量学实验室(LLE)、法国的原子能委员会(CEA)和英国原子能武器研究院(AWE)、我国激光聚变研究中心(LFRC)等多个单位的制靶技术研究团队在新型靶丸烧蚀层材料、超薄聚合物薄膜、新型靶丸支撑技术、黑腔制备技术、燃料填充冷冻技术、精密加工技术、精密测量技术、精密装配技术等靶科学与工程方面取得了卓有成效的进展,增材制造、计算视觉、机器算法等先进技术也逐渐应用于ICF靶制备中。制靶技术将在未来以不断增长的物理需求为牵引,发展更广、更精、更新的靶材料与制备技术,确保ICF研究目标的顺利实现。

制靶技术将在未来以不断增长的物理需求为牵引,发展更广、更精、更新的靶材料与制备技术,确保ICF研究目标的顺利实现。

## 参考文献:

- [1] 张林, 杜凯. 激光惯性约束聚变靶技术现状及其发展趋势[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3091-3097. (Zhang Lin, Du Kai. Target technologies for laser inertial confinement fusion: State-of-the-art and future perspective[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3091-3097)
- [2] Hamza A V, Nikroo A, Alger E, et al. Target development for the National Ignition Campaign[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69: 395-406.
- [3] Kritcher A L, Clark D, Haan S, et al. Comparison of plastic, high density carbon, and beryllium as indirect drive NIF ablaters[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 056309.
- [4] Landen O L, Edwards J, Haan S W, et al. Capsule implosion optimization during the indirect-drive National Ignition Campaign[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18: 051022.
- [5] Benredjem D, Jarrah W, Gilleron F, et al. Opacity calculations Ge and Si dopants in ICF[J]. *High Energy Density Physics*, 2015, 16: 23-27.
- [6] Hu S X, Fiksel G, Goncharov V N, et al. Mitigating laser imprint in direct-drive inertial confinement fusion implosions with high-Z dopants[J]. *Physical Review Letters*, 2012, 108: 195003.
- [7] Dittrich T R, Hurricane O A, Callahan D A, et al. Design of a high-foot high-adiabat ICF capsule for the National Ignition Facility[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112: 055002.
- [8] Haan S W, Huang H, Johnson M A, et al. Instability growth seeded by oxygen in CH shells on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 032708.
- [9] Haan S W, Clark D S, Baxamusa S H, et al. Update 2015 on target fabrication requirements for NIF layered implosions, with emphasis on capsule support and oxygen modulations in GDP[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 70: 121-126.
- [10] Huang H, Carlson L C, Requieron W, et al. Quantitative defect analysis of ablator capsule surfaces using a Leica confocal microscope and a high-density atomic force microscope[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 70: 377-386.
- [11] Nikroo A, Czechowicz D G, Castillo E R, et al. Production of higher strength thin walled glow discharge polymer shells for cryogenic experiments at OMEGA[R]. GA-A23881, 2002.
- [12] Huang H, Haas D M, Lee Y T, et al. Oxygen profile determination in NIF GDP capsules using contact radiography[J]. *Fusion Science and Technology*, 2013, 63: 142-150.
- [13] Chen K C, Cook R C, Huang H, et al. Fabrication of graded germanium-doped CH shells[J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49: 750-756.
- [14] Brusasco R, Saculla M, and Cook R. Preparation of germanium doped plasma polymerized coatings as inertial confinement fusion target ablaters[J]. *J Vac Sci Technol*, 1995, A13(3): 948-954.

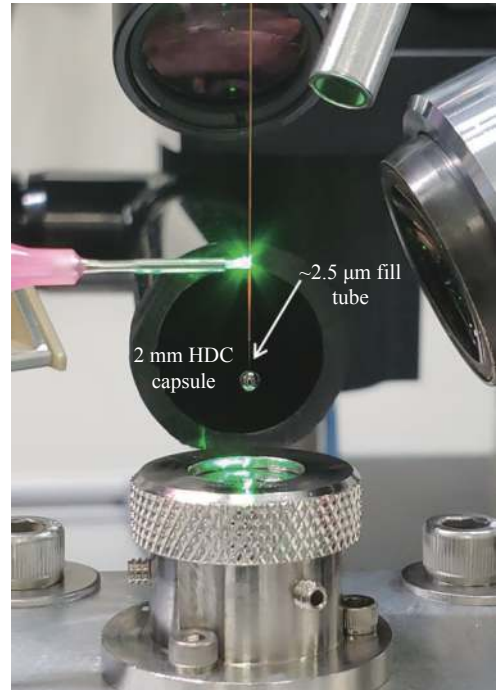


Fig. 14 Assembly of  $\phi 2.5\ \mu\text{m}$  fill tube and capsule

图 14 直径为  $2.5\ \mu\text{m}$  燃料填充管与靶丸组件



- [15] Reynolds H, Baxamusa S, Haan S W, et al. Surface oxygen micropatterns on glow discharge polymer targets by photo irradiation[J]. *Journal of applied physics*, 2016, 119: 085305.
- [16] Baxamusa S, Laurence T, Worthington M, et al. Photo-oxidation of polymer-like amorphous hydrogenated carbon under visible light illumination[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2015, 122: 133-138.
- [17] Lepro X, Ehrmann P, Menapace J, et al. Ultralow stress, thermally stable cross-linked polymer films of polydivinylbenzene (PDVB)[J]. *Langmuir*, 2017, 33: 5204-5212.
- [18] Lepro X, Ehrmann P, Rodriguez J, et al. Enhancing the oxidation stability of polydivinylbenzene films via residual pendant vinyl passivation[J]. *Chemistry Select*, 2018, 3: 500-506.
- [19] Baxamusa S H, Lepró X, Lee T, et al. Initiated chemical vapor deposition polymers for high peak-power laser targets[J]. *Thin Solid Films*, 2017, 635: 37-41.
- [20] Biener J, Mirkarimi P B, Tringe J W, et al. Diamond ablaters for Inertial Confinement Fusion[R]. UCRL-JRNL-213214, 2005.
- [21] Biener J, Mirkarimi P B, Tringe J W, et al. Diamond ablaters for Inertial Confinement Fusion[J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49: 737-742.
- [22] Clark D S, Kritcher A L, Yi S A, et al. Capsule physics comparison of National Ignition Facility implosion designs using plastic, high density carbon, and beryllium ablaters[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 032703.
- [23] Hopkins L B, LePape S, Divol L, et al. Toward a burning plasma state using diamond ablator inertially confined fusion (ICF) implosions on the National Ignition Facility (NIF)[J]. *Plasma Phys Control Fusion*, 2019, 61: 014023.
- [24] Biener J, Ho D D, Wild C, E, et al. Diamond spheres for inertial confinement fusion[J]. *Nucl Fusion*, 2009, 49: 112001.
- [25] Kato S, Hiroki, Yamada, et al. Synthesis and characterization of diamond capsules for direct-drive inertial confinement fusion[J]. *Diamond & Related Materials*, 2018, 86: 15-19.
- [26] Dawedeit C, Kucheyev S O, Shin S J, et al. Grain size dependent physical and chemical properties of thick CVD diamond films for high energy density physics experiments[J]. *Diam Relat Mater*, 2013, 40: 75-81.
- [27] Ohmagari S, Yamada H, Umezawa H, et al. Growth and characterization of freestanding p+ diamond (100) substrates prepared by hot-filament chemical vapor deposition[J]. *Diam Relat Mater*, 2018, 81: 33-37.
- [28] Zylstra A B, Yi S A, MacLaren S, et al. Beryllium capsule implosions at a case-to-capsule ratio of 3.7 on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 102704.
- [29] Simakov A N, Wilson D C, Yi S A, et al. Performance of beryllium targets with full-scale capsules in low-fill 6.72-mm hohlraums on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 052704.
- [30] Xu H, Youngblood K P, Huang H, et al. Characterization of thin copper diffusion barrier layer in beryllium capsules[J]. *Fusion Science and Technology*, 2013, 63: 202-207.
- [31] Huang H, Xu H W, Youngblood K P, et al. Inhomogeneous copper diffusion in NIF beryllium ablator capsules[J]. *Fusion Science and Technology*, 2013, 63: 190-201.
- [32] Youngblood K P, Huang H, Xu H W, et al. Thin oxides as a copper diffusion barrier for NIF beryllium ablator capsules[J]. *Fusion Science and Technology*, 2013, 63: 209-212.
- [33] Hoppe M L, Castillo E. Polishing of beryllium capsules to meet NIF specifications[J]. *Journal de Physique IV (Proceedings)*, 2006, 133: 895-898.
- [34] Bae J, Rodriguez J, Kong C, et al. Beryllium capsule processing improvements: Polishing and mandrel removal[R]. IFT/P2019-012, 2019.
- [35] Xu H W, Alford C S, Cooley J C, et al. Beryllium capsule coating development for NIF targets[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 51(4): 547-552.
- [36] Bhandarkar S, Letts S A, Buckley S, et al. Removal of the mandrel from beryllium sputter coated capsules for NIF targets[J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 51(4): 564-571.
- [37] Nagel S R, Haan S W, Rygg J R, et al. Effect of the mounting membrane on shape in inertial confinement fusion implosions[J]. *Physics of plasmas*, 2015, 22: 022704.
- [38] Meezan N B, Edwards M J, Hurricane O A, et al. Indirect drive ignition at the National Ignition Facility[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2017, 59: 014021.
- [39] Smalyuk V A, Robey H F, Alday C L, et al. Review of hydro-instability experiments with alternate capsule supports in indirect drive implosions on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 072705.
- [40] Weber C R, Casey D T, Clark D S, et al. Improving ICF implosion performance with alternative capsule supports[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 056302.
- [41] Hammel B A, Tommasini R, Clark D S, et al. Simulations and experiments of the growth of the “tent” perturbation in NIF ignition implosions[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2016, 717: 012021.
- [42] Haan S W, Atherton J, Clark D S, et al. NIF ignition campaign target performance and requirements: status May 2012[R]. LLNL-PROC-583732, 2012.
- [43] Haan S W, Lindl J D, Callahan D A, et al. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18: 051001.
- [44] Hammel B A, Weber C R, Stadermann M, et al. A “polar contact” tent for reduced perturbation and improved performance of NIF ignition capsules[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 082714.
- [45] 易勇, 卢忠远, 唐永建, 等. 激光聚变靶丸磁悬浮系统设[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(9): 1504-1506. (Yi Yong, Lu Zhongyuan, Tang Yongjian, et al. Design of magnetic suspension system for ICF target[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(9): 1504-1506)

- [46] 宋丽贤, 卢忠远, 廖其龙. ICF 用磁性玻璃靶丸悬浮磁场的确定及材料制备初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(11): 1705-1708. (Song Lixian, Lu Zhongyuan, Liao Qilong. Establishment of levitation magnetic field and preparation of materials for ICF magnetic glass targets[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(11): 1705-1708)
- [47] Glocker D A. A proposed design for multishell cryogenic laser fusion targets using superconducting levitation[J]. *Appl Phys Lett*, 1981, 39: 478-479.
- [48] Kreuz Ronald. Pellet delivery for the conceptual inertial confinement fusion reactor HIBALL[J]. *Fusion Technology*, 1985, 8(3): 2708-2720.
- [49] Yoshida H, Katakami K, Sakagami Y, et al. Magnetic suspension of a pellet for inertial confinement fusion[J]. *Laser and Particle Beams*, 1993, 11(02): 455.
- [50] Sakagami Y, Yoshida H, Yasufuku K, et al. Mechanism of optical forces of magnetically suspended pellet for laser fusion scheme[J]. *Fusion Engineering and Design*, 1999, 44: 471-473.
- [51] Tsuji R. Trajectory adjusting system using a magnetic lens for a Pb-coated superconducting IFE target[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2006, 81(23/24): 2877-2885.
- [52] Ishigaki Y, Ueda H, Agatsuma K, et al. Accurate position control of active magnetic levitation using sphere-shaped HTS bulk for Inertial Nuclear Fusion[J]. *IEEE Trans Applied Superconductivity*, 2009, 19(3): 2133-2136.
- [53] Aleksandrova I V, Koresheva E R. Review on high repetition rate and mass production of the cryogenic targets for laser IFE[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2017, e11(5): 1-24.
- [54] Baker A A, Aji L B, Bae J H, et al. Vapor annealing synthesis of non-epitaxial MgB<sub>2</sub> films on glassy carbon[J]. *Superconductor Science and Technology*, 2018, 31: 055006.
- [55] Li X, Xiao T, Chen F, et al. A novel superconducting magnetic levitation method to support the laser fusion capsule by using permanent magnets[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2018, 3(3): 104-109.
- [56] Young P E, Rosen M D, Hammer J H, et al. Demonstration of the density dependence of X-ray flux in a laser-driven hohlraum[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 101(3): 81-84.
- [57] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, et al. Inertially confined fusion plasmas dominated by alpha-particle self-heating[J]. *Nature Physics*, 2016, 12: 800-807.
- [58] 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[J]. *Physical Review Letters*, 2015, 115: 055001.
- [59] Le Pape S, Berzak Hopkins L F, Divol L, et al. Fusion energy output greater than the kinetic energy of an imploding shell at the National Ignition Facility[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120: 245003.
- [60] Kline J L, Batha S H, Benedetti L R, et al. Progress of indirect drive inertial confinement fusion in the United States[J]. *Nuclear Fusion*, 2019(59): 112018.
- [61] Ping Y, Smalyuk V A, Amendt P, et al. Enhanced energy coupling for indirectly driven inertial confinement fusion[J]. *Nature Physics*, 2019, 15(2): 138-141.
- [62] Amendt P, Cerjan C, Hinkel D E, et al. Rugby-like hohlraum experimental designs for demonstrating X-ray drive enhancement[J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15: 012702.
- [63] Vandenboomgaerde M, Bastian J, Casner A, et al. Prolate-spheroid ("rugby-shaped") hohlraum for inertial confinement fusion[J]. *Physical Review Letters*, 2007, 99: 065004.
- [64] Amendt P, Ross J S, Milovich J L, et al. Low-adiabat rugby hohlraum experiments on the National Ignition Facility: Comparison with high-flux modeling and the potential for gas-wall interpenetration[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 112703.
- [65] 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[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 022703.
- [66] Robey H F, Berzak Hopkins L, Milovich J L, et al. The I-Raum: A new shaped hohlraum for improved inner beam propagation in indirectly-driven ICF implosions on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 012711.
- [67] Tommasini R, Belyaev M, Cerjan C, et al. Ultra-high (>30%) coupling efficiency designs for demonstrating central hot-spot ignition on the National Ignition Facility using a Frustrum[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 082707.
- [68] Bhandarkar S, Baumann T, Alfonso N, et al. Fabrication of low-density foam liners in hohlraums for NIF targets[J]. *Fusion Science and Technology*, 2017, 73(2): 194-209.
- [69] Horwood C, Stadermann M, Biener M, et al. Platinum electrodeposition for supported ALD templated foam hohlraum liners[J]. *Fusion Science and Technology*, 2017, 73(2): 219-228.
- [70] Clark D S, Weber C R, Kritcher A L, et al. Modeling and projecting implosion performance for the National Ignition Facility[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 032008.
- [71] Edwards M J, Marinak M, Dittrich T, et al. The effects of fill tubes on the hydrodynamics of ignition targets and prospects for ignition[J]. *Phys Plasmas*, 2005, 12: 056318.
- [72] Hammel B A, Haan S W, Clark D S, et al. High-mode Rayleigh-Taylor growth in NIF ignition capsules[J]. *High Energy Density Physics*, 2010, 6(2): 171.
- [73] MacPhee A G, Smalyuk V A, Landen O L, et al. Mitigation of X-ray shadow seeding of hydrodynamic instabilities on inertial confinement fusion capsules using a reduced diameter fuel fill-tube[J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25: 054505.
- [74] Haan S W, Kritcher A L, Clark D S, et al. Comparison of the three NIF ablaters[R]. LLNL-TR-741418, 2017.
- [75] Nikroo A. Target fabrication at Lawrence Livermore National Laboratory[R]. LLNL-PRES-956011, 2019.