

国家点火装置(NIF)点火靶制备技术研究进展

杜 凯[†] 唐永建

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 621900)

摘 要 文章介绍了国家点火装置(NIF)点火靶制备技术在近年来取得的一些最新进展,主要内容包括芯轴与靶丸的制备,氘氚(DT)冰层的均匀化等方面.

关键词 国家点火装置(NIF),靶丸,柱腔

Progresses of National Ignition Facility target

DU Kai[†] TANG Yong-Jian

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

Abstract The latest developments of the National Ignition Facility's ignition target, including the preparation of the Be and CH capsules, Au/DU cocktail hohlraum, and DT ice layering, are reviewed.

Keywords National Ignition Facility, capsule, hohlraum

惯性约束聚变(ICF)是依靠热核燃料和推进层剩余质量的惯性对高温高密度热核燃料进行约束,使其实现热核聚变,从而获取聚变能的方法^[1].在军事领域,ICF可以用于指导武器的设计;在民用领域,惯性聚变能(IFE)的成功开发可以为人类提供取之不尽、用之不竭的清洁能源.因此,包括美国、法国、日本、俄罗斯和中国在内的世界许多国家从上世纪60年代开始就坚持不懈地进行ICF研究工作.ICF研究近期的主要目标是实现聚变点火(局部热核反应产生的能量能加热周围的部分冷燃料达到热核反应所需的温度,为继续反应创造条件).为此,美国和法国相继开始建造能量超过1MJ的大型激光装置——“国家点火装置(NIF)”和“兆焦耳激光装置(LMJ)”.由于LMJ相关公开报道较少,本文主要介绍NIF点火物理实验用靶研制的进展情况.

1 NIF 概况

NIF装置位于美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL),是一个由192束固体钨玻璃激光组成的庞大系统^[2,3].NIF计划开始于1995年,其主要目的就是为在实验室内获得ICF点火并开展相关的高能密度物理实验研究.NIF装置设计的到达靶的激光

能量~1.8MJ,脉冲峰值功率500TW,激光波长350nm,打靶能力~1000发/年.该装置的实验室建设于2001年完成.在2002年开展了NIF早期光(NEL)实验,实验演示了NIF的设计性能及装置的可操作性.2008年9月,最后一组8束束线完成试运行,总输出能量达到4.22MJ(红外).预计该项目将于2010年3月完成.

2 NIF 点火靶设计

为了实现点火目标,点火靶在设计上必须满足能量、对称性、冲击波时间及流体力学等几个方面的要求.设计时必须考虑激光器的最大能量、峰值功率、功率平衡及瞄准精度;还要考虑靶参数与理想状况的偏差,如靶丸与燃料表面的粗糙度,外形尺寸及材料组成和密度的变化等.

在NIF基准点火靶设计(如图1所示)中^[4-7],采用了两种不同的靶丸材料:一种是铍(Be)掺铜(Cu);另一种是碳氢(CH)掺锗(Ge).靶丸直径约2mm.掺杂材料在母体材料中的浓度沿径向变化.掺杂浓度的变化极大地改善了靶丸的流体力学稳定性,屏蔽X射

2009-11-10 收到

[†] 通讯联系人. Email: icf802@163.com

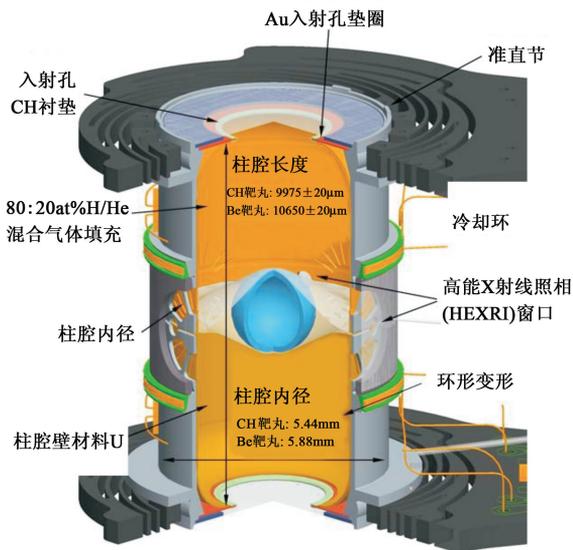


图1 NIF 点火靶示意图

射线入球壳最内层并保持其密度接近于氘气(DT)燃料密度. 柱腔的长度与直径根据靶丸材料的不同略有差异,分别为 10mm 和 5.5mm 左右. 柱腔材料采用三层结构:最内层为金(Au)保护层,为了减少激光与 Au 等离子体相互作用引起的散射,特别是受激布里渊散射(SBS),在 Au 保护层中适量掺入元素硼(B);中间层为适当厚度(大于 $7\mu\text{m}$)的铀(U)层;最外层为 $30\mu\text{m}$ 厚的 Au 支撑层. 为了抑制腔壁高原子序数(Z)等离子体过快移动,改善腔内辐射场的均匀性,柱腔内要填充低压混合气体或者超低密度($1\text{mg}/\text{cm}^3$)二氧化硅(SiO_2)气凝胶材料.

3 研制进展情况

3.1 靶丸

3.1.1 Be 靶丸

通用原子公司(GA)与 LLNL 采用物理气相沉积(PVD)技术制备 Be 靶丸. 首先采用磁控溅射技术在聚合物微球表面镀上一定厚度的 Be 或 BeCu 涂层,然后通过热降解除去聚合物微球,得到空心 Be 或 BeCu 微球. 这可能是唯一一种能够制备梯度 Cu 掺杂 Be 靶丸的技术. 相关的研究工作在 20 世纪 90 年代已经开展. Alford 等^[8]研究了不同制备条件下 Be 膜的性质,重点关注如何改善薄膜表面形貌和微观结构. 实验结果表明,基底加偏压有助于改善薄膜表面质量,加 120V 偏压时,薄膜均方根粗糙度从 150nm 降至 40nm,同时晶粒尺寸有所降低而薄膜密度有所提高. XRF 分析表明,在 120V 偏压条件下,薄膜内有氩粒

子存在,偏压小于或等于 80V 则不存在. 在沉积过程中通入氮气,氮化物的形成降低了晶粒尺寸,粗糙度下降至 60—70nm. Xu 等^[9]在 2006 年已经在 CH 空心微球表面制备出 $50\mu\text{m}$ 的 Be 球壳. 扫描电子显微镜(SEM)断面分析表明,Be 为柱状结构. AFM 功率谱分析 Be 球壳的均方根表面粗糙度在 101—1000 模数之间为 282nm. 膜层密度约为 95%—96%块体 Be 材料密度. Cu 掺杂 Be 球壳的制备采用 Be 与 Cu 的共溅射. McElfresh 等^[10]通过细致的研究发现:如果每天按照正常的工作时间停止实验,涂层中的 Be 保持柱状结构,当达到一定厚度时,生长方式由柱状生长转变为颗粒引发增长. 如果保持连续沉积,则转变为“扭曲的”生长方式,这时得到的涂层密度较低. 降低沉积速率可以抑止“扭曲”生长. 实验没有发现 Cu 掺杂含量对涂层微观结构的影响.

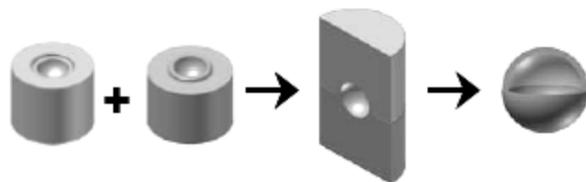


图2 精密加工制备 Be 靶丸示意图

LANL 的 Nobile 等^[11]采用扩散连接方法制备 BeCu 合金靶丸. 首先在合金棒料上精密加工相应的半球,然后通过真空扩散的方式将两个半球连接在一起,最后再通过精密加工形成合金球壳(如图 2 所示). 冲击波通过晶粒的速度是晶粒方向的函数,为了避免冲击波通过时造成的不稳定性增长,必须保证合金材料的晶粒小于 $10\mu\text{m}$. 比靶丸壁厚小的晶粒尺寸也是保证 BeCu 合金具有多晶材料强度的条件. 另外合金材料中杂质的浓度必须小于 $100\%/Z^2$, Z 是杂质元素的原子序数. 具有精细晶粒结构的 Be 及 Be 合金一般采用粉末热等静压方法制备,但是该方法制备的 Be 及 Be 合金在晶粒的边界处有大量的氧杂质存在. 为此开发了真空电弧熔化技术,通过反复地熔化和酸刻蚀除去杂质. 通过真空熔化技术获得的 BeCu 合金晶粒呈柱状且尺寸较大,为此采用等通道角挤压成型技术(equal channel angular extrusion, ECAE)细化晶粒. ECAE 技术是将合金材料强制通过一个特殊设计的通道,使其产生极大程度的应变,从而细化晶粒. Be 靶丸的优点之一在于它在室温下能承受 40MPa 的压力,因此可以避免靶丸始终处于燃料的冷冻温度下. 为了满足上述要求,两个半球的连接强度必须接近金属 Be 的强度. 采用在连接表面沉积一层金属薄膜($1\mu\text{mAl}$)的方法,可以提高连接强度. 由于

和 C 反应,一般认为金刚石刀具不适用于 Be 的加工。但实验发现,对于小样品(2mm)采用金刚石刀具可以获得光滑的表面(粗糙度为 18nm)。平面样品的抛光实验表明,对于纯 Be 采用 50nm 的 SiO₂ 悬浮抛光液可以获得很好的效果,而 BeCu 样品也可以满足点火靶丸的需要。Alexander 等^[12]采用上述技术,在工艺优化的基础上,获得了化学均匀性与纯度很好的 Be-Cu 合金样品,没有空穴和偏析现象,样品连接强度高,且连接面窄。

采用磁控溅射技术制备 BeCu 靶丸内表面含有一层 CH,这对靶设计而言并不是问题,但在实际应用中则不然。因为 Be 的热膨胀系数远远小于 CH,在冷冻的条件下(~18K),CH 层可能从球壳上脱离,因此必须事先将 CH 层除去。Cook 等^[13]发展了热裂解技术除去 CH 层的理论模型与实验技术。首先在靶丸表面打一微孔,然后在一定温度下将 CH 层热裂解成 CO₂ 和 H₂O 等气体产物排出。实验证明该方法是有效的,但仍然有极小(1μm 宽,10—20nm 高)的碳基沉积物残留在靶丸内表面,而 Be 层的氧化程度还需要进行更详细的计算。

3.1.2 CH 靶丸

相对于 Be 靶丸,CH 靶丸具有透过率高,可以实现 DT 冰层的光学测量与红外加热,结构致密无微缺陷且表面光洁度高等特点^[14]。CH 靶丸制备首先采用辉光放电聚合技术(GDP),在聚α甲基苯乙烯(PAMS)微球表面制备 CH 涂层,然后在一定温度下将 PAMS 热降解为小分子气体除去。点火物理实验对靶丸有非常苛刻的要求:如高的表面光洁度,在模数 100—1000 之间均方根粗糙度须小于 24nm;精确的掺杂浓度与涂层厚度,浓度偏差必须小于 0.15at%,总的涂层厚度偏差须小于 2.7μm^[5];较好的热稳定性等。因此 CH 靶丸的制备技术研究,主要围绕靶丸壳层的表面粗糙度问题、靶丸强度问题、Ge 掺杂浓度控制与厚度控制精度问题以及靶丸芯轴去除等多个方面开展研究工作。

影响 CH 靶丸表面粗糙度的主要因素包括涂层制备参数、芯轴表面形貌与状态、靶丸涂镀过程中的碰撞与瞬态成核等。涂层制备参数的优化研究发现,不同的工作压力条件下,CH 涂层具有不同的生长结构,导致其表面粗糙度有较大差异;随着反式丁二烯/氢气(T₂B/H₂)流量比例的减小,CH 涂层的表面粗糙度逐渐减小^[15]。芯轴表面形貌极大地影响 CH 靶丸表面粗糙度,聚α甲基苯乙烯(PAMS)芯轴表面的低模数突起是 CH 涂层低模数粗糙度增大的因素之一^[16]。在靶丸

涂镀过程中,微球之间、微球与器壁之间的碰撞是靶丸表面产生突起等缺陷的重要因素^[17]。相比传统的跳动激励方式,采用滚动激励装置可以有效地减少 CH 靶丸表面突起缺陷,降低低模数粗糙度。

影响 CH 靶丸强度的因素主要包括工作压力、气体流量比例等^[18—20]。研究发现,随着工作气压的降低,CH 涂层强度逐渐增大;在较低的工作气压下,CH 涂层强度随 T₂B/H₂ 流量比例的减小而增大;当工作压力较高时,CH 涂层强度随 T₂B/H₂ 流量比例的变化不明显^[19]。当氢气流量较高时,CH 涂层强度随 T₂B/H₂ 流量比例减小不是单调增加,而是先增大后减小,出现极值。

3.1.3 打孔与充气

由于 Be 对氢同位素是非渗透的,同时为了避免高压放射性气体(主要是氚)操作时带来的危险,靶丸燃料气体的填充采用打孔注入的方式。在点火靶设计中,充气小孔的直径为 5μm,带有一直径为 12μm、深 40μm 的沉孔。靶丸打孔技术包括放电加工(EDM)、飞秒激光加工及聚焦离子束(FIB)等。打孔的困难在于其纵横比(深度与直径之比)大(约 35),而 EDM 与 FIB 对固体金属材料加工的纵横比一般为 18 和 12。FIB 的优势在于它具有在线 SEM 观察的能力,能够提高沉孔与微孔的相对位置精度。Wilkins 等^[21]采用 FIB 技术,在镀 46.9μm 的 CH 芯轴上获得了 15μm 的微孔。实验中发现了由于材料的再沉积造成的堵孔现象,因此采用 FIB 技术在 50μm 厚的 Be 壳层上打 5μm 的微孔几乎是不可能的。Armstrong 等^[22]开发了专门用于深孔加工的飞秒激光装置并在 Be 箔上获得了纵横比达到 41 的微孔。实验发现,微孔另一端的形状和激光特性有关。

充气管材料采用玻璃或者聚酰亚胺^[23]。将商品毛细管加热拉伸至外径 10—12μm,内径 5—6μm,然后置于靶丸沉孔中用紫外光固化胶固定,胶的用量小于 2pL。图 3 给出了连接充气管的 Be 靶丸照片和 SEM 照片。

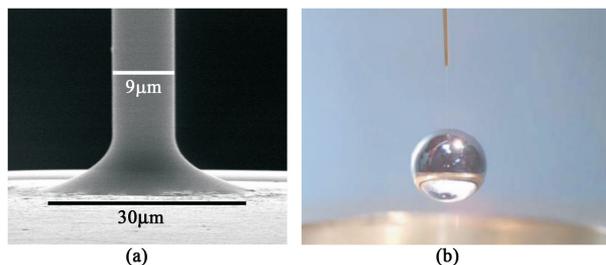


图 3 连接充气管的 Be 靶丸照片(a)和 SEM 照片(b)

3.2 DT 冰分层

根据 NIF 点火物理设计, 点火靶中的燃料主要由靶丸中一层 $75\mu\text{m}$ 厚的 DT 冰层组成, 该冰层必须厚度均匀, 在 $50\mu\text{m}$ — 1mm 的空间尺度内满足粗糙度小于 $0.8\mu\text{m}$ 的能量谱密度(PSD)曲线, 没有体积超过 $1.5\mu\text{m}^3$ 的空穴, 在内表面的孔隙总体积小于 0.2% ^[24].

在美国, 冷冻靶的研究历史已有 30 多年. 目前已开发出红外加热、快速冷冻、 β 分层等多项 DT 冰层均匀化技术, 其中只有 β 分层技术可以较好地满足 NIF 点火靶设计要求^[25]. 该技术是利用氚的 β 衰变释放一个平均能量为 6keV 的电子, 这种电子在固体 DT 冰中的自由程只有 2 — $3\mu\text{m}$, 因此能量可以局域沉积并均匀加热 DT 冰. 在一个球形对称的靶丸表面, 由于 β 加热引起的径向温度梯度导致较厚部分的 DT 冰升华, 沉积在温度较低、较薄的区域. 如果靶丸表面刚好处于 DT 三相点 (19.79K) 之下, DT 冰会最终形成均匀的厚度分布.

DT 冰层的表面粗糙度定量分析采用 X 射线相衬成像技术(适用于不透明 Be 靶丸和透明 CH 靶丸)和可见光阴影成像技术(只适用于透明 CH 靶丸). NIF 点火设计要求 DT 冰层温度低于三相点温度 1.5K , 以满足点火物理实验对 DT 蒸气的需要. 一般的冷冻 DT 冰层的制备方案如下: 首先在靶丸内充入 DT 液体, 将其冷冻至凝固点 1K 以下; 接着缓慢升温融化 DT 冰至只留下 100 — $200\mu\text{m}$ 大小的“晶核”; 然后以低于 $1\text{mK}/\text{min}$ 的速率降温到三相点之下 1.5K , 恒温形成均匀 DT 冰层. 实验表明: 均匀的 DT 冰层可以在三相点附近形成, 但随着温度的降低, 冰层均匀性变差. 当降温速率在 $1\text{mK}/\text{min}$ 或更低时, 这种粗糙化现象会减少, 但同时产生较多不连续的晶界特征^[26]. 这些晶界的典型深度为 $15\mu\text{m}$, 宽度为 $45\mu\text{m}$, 超过了点火靶设计允许的范围. 为此提出了一种“迅速冷却”的方案, 即首先缓慢降温至低于三相点 0.25K , 然后在 5 — 25s 内将温度降至三相点之下 1.5K . 目前的研究主要集中于确定最佳的冷却方案, 以保证在达到所需温度之前不出现超过允许范围的缺陷. 另外, 靶丸的迅速冷却依赖于整个冷冻靶系统(包括柱腔). 靶丸温度与柱腔温度的时间延迟也需要实验进行详细研究.

3.3 柱腔

尽管与直接驱动 ICF 相比, 间接驱动可以提供更加均匀的驱动能, 但却要承受激光—X 射线转换过程中的能量损失. 现阶段间接驱动 ICF 实验一般

采用 Au 作为激光—X 射线转换柱腔材料. 在 Omega 装置上进行的实验及理论模拟表明, 在 Au 中掺入高 Z 元素可以减少 X 射线渗透进入柱腔壁造成的能量损失, 从而有效地改善柱腔的激光—X 射线转换效率. 根据计算结果, 采用贫铀(DU)可以降低 17% 左右的能量损失^[27]. NIF 最初的物理设计采用 Au, DU 和 Dy 等金属的混合材料^[28], 由于在实验过程中发现 DU 的氧化严重, 因此改为 DU 和 Au 的交替多层柱腔. 其结构如下: 最内层是厚度小于 $0.5\mu\text{m}$ 的 Au 保护层; 中间层是 DU 和 Au 交替的“鸡尾酒”层, 总厚度不小于 $7\mu\text{m}$, 由 $75\text{at}\%$ 的 DU 和 $25\text{at}\%$ 的 Au 组成. 为了保证对通过柱腔传播的辐射波而言组成是均匀的, 每一层的厚度必须足够小(根据组成确定 DU 层厚度为 30nm , Au 层厚度为 8.2nm); 最外层是约 $30\mu\text{m}$ 厚的 Au 支撑层, 同时为柱腔提供结构强度和 DU 的腐蚀防护.

DU/Au“鸡尾酒”柱腔制备主要涉及芯轴制备、“鸡尾酒”材料涂层的制备、二次加工和芯轴腐蚀等四个过程, 具体工艺流程如图 4 所示.



图 4 “鸡尾酒”柱腔制备工艺流程

“鸡尾酒”柱腔的芯轴基底材料为 Al, 采用金刚石车床加工至所需尺寸, 表面均方根粗糙度好于 20nm , 然后依次磁控溅射 $2\mu\text{m}$ 的 Cu, 电镀 $3\mu\text{m}$ 的 Au, 电镀 0.2 — $0.5\mu\text{m}$ 的 Au 保护层. 由于芯轴是整个柱腔制备的基础, 对柱腔质量有非常关键的影响, 因此电镀过程的电流密度等参数必须仔细选择, 以优化芯轴的表面质量与热传导率等.

制备“鸡尾酒”材料涂层的磁控溅射装置包括 6 个固定的靶枪和一个旋转的工件夹持臂(见图 5)^[29]. 夹持臂上的工件夹持器与靶枪相互对应并旋转. 通过计算机精确控制夹持臂的位置以保证每个芯轴的镀膜时间. 涂层技术的关键在于如何减少涂层的应力, 这种应力会造成柱腔的变形甚至破裂. Wilkens 等^[29]的工作表明, 加热芯轴有利于降低膜

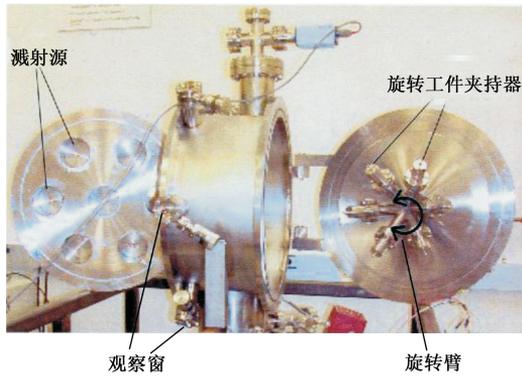


图 5 “鸡尾酒”柱腔制备用磁控溅射系统

层的应力。

二次加工的目的是在柱腔上制备出 LEH 和用于 DT 冰层 X 射线照相的“starburst”。在二次加工后,必须在加工后所暴露出的表面镀约 $10\mu\text{m}$ 的 Au,以避免 DU 层在随后的腐蚀、保存及装配过程中的氧化腐蚀。DU 是一种极易氧化的金属,氧的存在首先会导致 DU 晶格膨胀从而造成涂层破裂,其次会增加柱腔壁的离子化热容量从而降低柱腔的激光-X 射线转换效率,因此芯轴的腐蚀过程必须仔细控制,确保 DU 不与腐蚀液(Al 芯轴采用 NaOH 溶液,Cu 保护层采用稀 HNO_3 溶液)反应。Al 芯轴的腐蚀需要 10 多个小时,而 Cu 保护层则只需要几分钟。Cu 层的腐蚀需在显微镜下控制进行,一旦标志 Cu 与稀 HNO_3 溶液反应的氢气泡消失,应立即将柱腔取出。实验证明,电镀的 $0.2\text{--}0.5\mu\text{m}$ Au 层并非完美的保护层,腐蚀液有可能通过涂层中的微孔或针孔渗透并与 DU 反应。一旦 Au 层开始形成微裂缝(由于 DU 与腐蚀液的反应造成),那么由于氧化造成 DU 层不能恢复的损失将无法避免,因此采用镀 Cu 的 Al 芯轴比采用纯 Cu 芯轴更为有利。由于柱腔的激光-X 射线转换效率实验只有在对柱腔材料组成有确切了解的基础上才有意义,因此对多层“鸡尾酒”柱腔的组成及其影响因素需要进行详细的研究。俄歇电子能谱(AES)分析表明^[30],由于“阴影效应”的影响,在柱腔表面制备的“鸡尾酒”涂层和在平面基底上制备的涂层样品的结构并不相同(见图 6)。在平面基底上沉积的“鸡尾酒”涂层均匀平整,存在明显的 Au/DU 界面;在 Omega 级芯轴表面的涂层则起伏不平,在 Au/DU 多层间存在明显的混合。经过仔细工艺控制后获得的柱腔涂层中的氧含量小于 5%,满足 NIF 点火靶设计要求。

DU/Au“鸡尾酒”柱腔在制备过程中仍存在一些难以根本解决的困难,因此在最新的靶设计方案

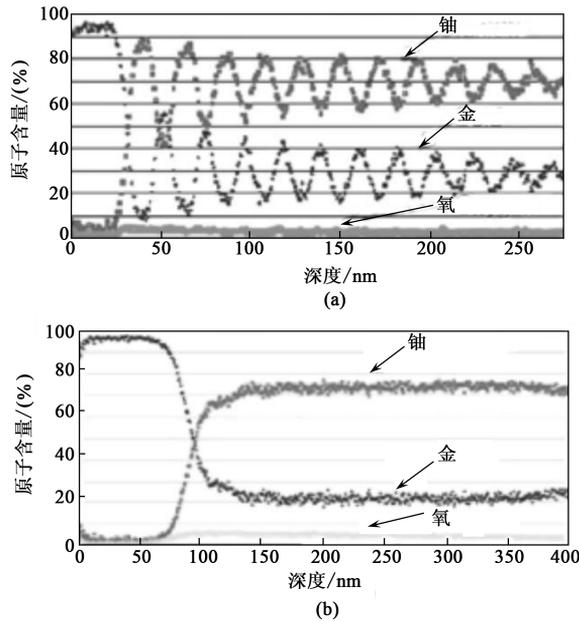


图 6 “鸡尾酒”涂层材料原子百分含量的 AES 分析 (a) 平面 Si 基底;(b) Omega 级芯轴

中采用了前述的三层结构^[5]。和“鸡尾酒”柱腔相比,这种柱腔的制备难度有所降低,但芯轴的腐蚀和 U 层的抗氧化防护仍是需要解决的关键问题。

4 结论

NIF 点火靶是复杂而且精细的,需要在材料制备、精密加工与装配、低温冷冻技术领域取得巨大进展的基础上才能实现。经过十多年的努力,在靶丸制备、充气与冷冻、柱腔涂层制备与芯轴腐蚀等方面已经取得了卓有成效的进展。到目前为止,没有发现完成点火靶研制道路上存在不可克服的科学和技术难题。相信在最近的两三年内,NIF 能够实现当初确定的点火目标。

参考文献

- [1] 张钧,常铁强. 激光核聚变靶物理基础. 北京:国防工业出版社, 2004 [Zhang J, Chang T Q. Fundamentals of the Target Physics for Laser Fusion. Beijing: National defence Industry Press, 2004 (in Chinese)]
- [2] Campbell E M, Hogan W J. Plasma Phys. Control. Fusion, 1999, 41: B39
- [3] Mosesa E I, Bonanno R E, Haynam C A *et al.* Eur. Phys. J. D. 2007, 44: 215
- [4] Hammel B A. Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, 48: B497
- [5] Haan S W, Callahan D A, Edwards M J *et al.* Fusion Sci. Technol., 2009, 55: 227
- [6] Jaquez J S, Nikroo A, Wilkens H L. Fusion Sci. Technol., 2009, 55: 313
- [7] Hann S W, Herrmann M C, Amendt P A *et al.* Fusion Sci.

- Technol. , 2006, 49; 553
- [8] Alford C S. Sputter deposited beryllium capsule for NIF, UCRL-D-129463, 1998
- [9] Xu H, Nikroo A, Wall J R. Fusion Sci. Technol. , 2006, 49; 778
- [10] McElfresh M, Gunther J, Alford C *et al.* Fusion Sci. Technol. , 2006, 49; 786
- [11] Nobile A, Cooley J C, Alexander D J *et al.* Development of beryllium-copper alloy ignition capsules, the Third International Conference on Inertial Fusion Science and Application, California, USA, 2003: 758—761
- [12] Alexander D J, Cooley J C, Cameron B J *et al.* Fusion Sci. Technol. , 2006, 49; 796
- [13] Cook R C, Letts S A, Buckley S R *et al.* Fusion Sci. Technol. , 2006, 49; 802
- [14] Chen K C, Cook R C, Huang H *et al.* Fusion science and technology, 2006, 49; 750
- [15] Theobald M, Dumay B, Chicanne C *et al.* Fusion science and technology, 2004, 45;176
- [16] Nikroo A, Pontelandolfo J M, Castillo E R. Coating and mandrel effects on fabrication of glow discharge polymer NIF scale indirect drive capsules, General Atomics Report, GA-A23757, 2002
- [17] Chen KC, Lee Y T, Huang H *et al.* Reduction of isolated defects on Ge doped CH capsules to below ignition specifications, General Atomics Report, GA-A25663, 2007
- [18] Czechowicz D G, Crstillo E R, Nikroo A. Composition and structural studies of strong glow discharge polymer coatings, General Atomics Report, GA-A23753, 2002
- [19] Nikroo A, Czechowicz D G, Crstillo E R *et al.* Recent progress in fabrication of high strength glow discharge polymer shells by optimization of coating parameters, General Atomics Report, GA-A23758, 2002
- [20] Nikroo A, Czechowicz D G, Chen K C *et al.* Mechanical properties of thin GDP shells used as cryogenic direct drive targets at OMEGA, General Atomics Report, GA-A24475, 2003
- [21] Wilkens H L, Hamza A V, Nikroo A *et al.* Fusion Sci. Technol. , 2006, 49; 809
- [22] Armstrong J P, Rubenchik A M, Gunther J *et al.* Fusion Sci. Technol. , 2006, 49; 822
- [23] Takagi M, Saito K, Frederick C *et al.* Fusion Sci Technol. , 2007, 51; 638
- [24] Atherton L J. Journal of Physics, 2008, 112; 032063
- [25] Sangster T C, Betti R, Craxton R S. Physics of Plasmas, 2007, 14; 058101
- [26] Moody J D, Koziowski B J, Mapoles E R *et al.* Journal of Physics, 2008, 112; 032064
- [27] Jones O S, Schein J, Rosen M D *et al.* Physics of Plasmas, 2007, 14; 056311
- [28] Hann S W, Dittrich T, Strobel G *et al.* Fusion Sci. Technol. , 2002, 41; 164
- [29] Wilkens H L, Gunther J, Mauldin M P *et al.* Fusion Sci. Technol. , 2006, 49; 846
- [30] Wilkens H L, Nikroo A, Wall D R *et al.* Physics of Plasmas, 2007, 14; 056310