

惯性约束聚变点火靶候选靶丸特点及制备研究进展

张占文[†] 漆小波 李波

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2011年7月11日收到; 2011年9月3日收到修改稿)

获得能量增益实现点火是目前激光惯性约束聚变领域研究的主要方向和标志性成果. 在点火靶的设计中有多种可能的候选靶丸, 包括碳氢掺杂锗、铍掺杂铜、聚酰亚胺、碳化硼和金刚石靶丸, 其中碳氢和铍靶丸是最主要的候选靶丸. 文中主要总结了几种候选靶丸的优缺点及目前研制现状. 在国外, 碳氢靶丸是目前点火靶的首选靶丸. 与铍靶丸相比, 不存在明显的微结构缺陷, 制备较容易; 靶丸光学透明, 适宜于燃料分层和表征; 靶丸在制备上更容易达到点火靶要求. 美国的碳氢点火靶靶丸基本达到了设计要求, 这些要求包括几何尺寸、壳层密度、壳层缺陷、表面光洁度、掺杂水平和杂质含量等. 我国的点火靶靶丸研究还处在起步阶段.

关键词: 惯性约束聚变, 点火靶, 靶丸

PACS: 52.57.-z, 52.57.Bc

1 引言

激光惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, 简记为 ICF) 是利用功率巨大的激光将能量作用到靶上, 将燃料向内压缩, 燃料由于自身惯性还来不及向四周飞散就被加热到极高温并发生聚变反应. 聚变反应将释放大量的能量, 这种能量一般称为聚变能, 是可供人类长期使用的最理想的新能源之一. 聚变反应进行过程中, 一方面核聚变在释放能量, 另一方面高温等离子体又在损失能量使等离子体温度下降. 如果将聚变反应产生的带电粒子约束在等离子体内部, 用来加热等离子体, 补偿等离子体的能量损失, 以维持聚变反应所需的温度, 这样就毋需再从外界输入能量, 聚变反应也能自持地进行下去, 实现净能量增益. 表征这个概念的学术术语叫做聚变点火, 或称热核点火^[1,2]. 目前, ICF 的研究热点是在实验室条件下进行点火的演示实验. 点火装置建设及点火靶制备都是具有挑战性的任务, 美国在 2009 年完成了国家点火装置 (national ignition facility, 简记为 NIF) 建设, 法国的兆焦耳激光装置 (laser MegaJoule, 简记为 LMJ) 正在建设中. 美国的点火靶制备技术已基本达到点火实验设计

要求, 我国的点火靶关键技术研究正处在起步阶段. 文中内容包括点火靶靶丸主要要求、常用制备方法、几种主要候选靶丸的特点、制备关键技术及难点、制备现状等, 并分析了几种候选点火靶丸的发展趋势.

2 点火靶丸要求及候选靶丸种类

点火靶使用的聚变燃料为氘氚 (deuterium tritium, 简记为 DT), 对于 DT 聚变反应, 点火条件的 Lawson 判据可以用燃料质量密度 (ρ) 和靶丸半径 (R) 的乘积表示, 考虑产物 α 粒子的射程, DT 反应的 Lawson 判据为 0.3 g/cm^2 , 实际上聚变条件要比这里的条件高得多, 最佳值约为 3 g/cm^2 , 即 $\rho R > 3 \text{ g/cm}^2$. 点火条件要求可概括为高温和高 ρR ^[2]. 如何使燃料达到 10^8 K 的高温和高密度, 并达到 $\rho R > 0.3 \text{ g/cm}^2$, 这是惯性约束聚变物理的关键. 采用球形内爆压缩技术可实现上述指标, 即采用激光或激光转换的 X 光均匀压缩充装燃料的靶丸, 以达到点火条件^[2].

在激光惯性约束间接驱动点火实验中, 主要有中心点火、快点火和体点火三种方式的点火靶设

[†] E-mail: bjzzw1973@163.com

计. 中心点火靶丸结构由外到内依次为球壳、固体燃料冰层 (占总燃料 90%以上) 和气体燃料. 以美国的掺锗碳氢靶丸 (carbon hydrogen, 简记为 CH) 3.1 版本为例 (见图 1), 靶丸外半径 1092 μm , 壁厚 165 μm , 掺锗 (Ge) 层厚度 48 μm , 掺杂浓度从外到内依次为 0.3% 和 0.6%, 冰层厚度 75 μm [3].

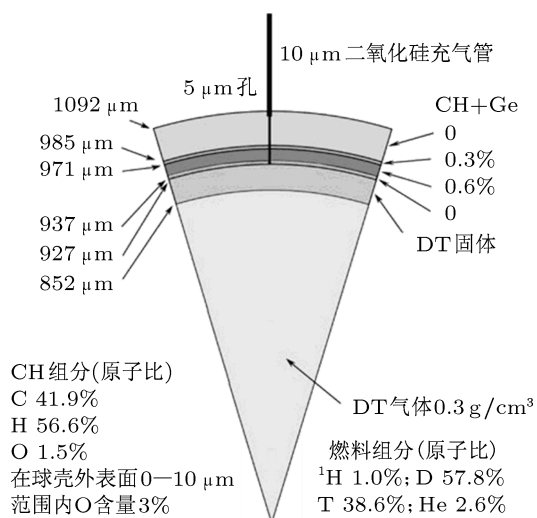


图1 碳氢靶丸版本 3.1 参数及结构示意图

内爆压缩过程中必须严格控制流体力学不稳定性. 实现比较好的球形内爆和球面汇聚对靶丸的要求包括以下几个方面 (未涉及对燃料冰层的要求):

(1) 壳层材料, 球壳材料要求为低原子序数如氢 (H), 铍 (Be), 硼 (B), 碳 (C), 氮 (N), 氧 (O) 根据需求可添加少量中, 高原子序数元素, 如硅 (Si), 铜 (Cu), Ge, 溴 (Br);

(2) 几何尺寸要求, 包括球壳和掺杂壳层的直径、壁厚、球形度和表面光洁度;

(3) 结构和缺陷控制, 包括球壳的密度、结晶形态 (晶型和取向)、微缺陷和杂质元素含量上限控制等, 如果有掺杂, 对掺杂元素的含量、厚度、分布等也有一定要求.

根据上述要求, 点火靶候选靶丸主要为掺 Cu 的 Be (beryllium doped with copper, 简记为 Be (Cu)), 掺 Ge 的 CH (carbon hydrogen doped with germanium, 简记为 CH (Ge)), 聚酰亚胺 (polyimide, 简记为 PI)、金刚石 (或高密度碳) 和碳化硼靶丸等 [2-6]. CH 为辉光放电等离子体聚合物 (glow discharge polymer, 简记为 GDP).

3 点火靶丸制备方法

3.1 降解芯轴技术

降解芯轴技术制备空心微球主要有三个步骤 [7-9], 以降解芯轴技术制备 GDP 靶丸为例, 制备过程如图 2 所示. 首先制备空心聚- α -甲基苯乙烯微球 (poly(α -methylstyrene), 简记为 PAMS), 然后以 PAMS 微球为芯轴, 利用等离子体气相沉积技术在微球表面制备 GDP 涂层, 最后降解掉内层的 PAMS 微球后得到空心 GDP. 对于 Be, 金刚石和沉积法制备的碳化硼靶丸, 沉积温度高, 一般以 GDP 微球为芯轴, 因降解产物很难扩散到球壳外部, 降解前需要在球壳表面开微孔. 降解芯轴技术几乎可以制备点火靶的所有候选靶丸, 对于主要候选靶丸——梯度掺杂的 CH(Ge) 和 Be(Cu) 靶丸, 降解芯轴技术是唯一的制备途径.

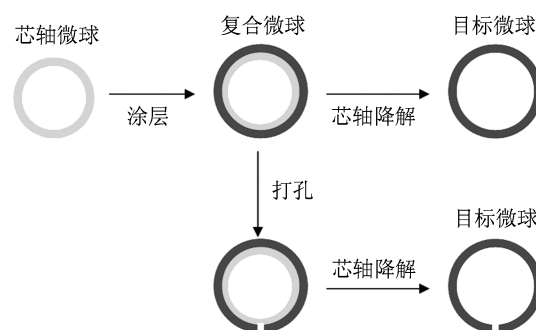


图2 降解芯轴技术制备空心微球过程示意图

3.2 半球加工复合技术

半球加工复合技术制备微球时, 采用机械加工方法制备半球, 然后利用热复合技术将两半球复合成一完整微球 [10]. 半球加工复合技术主要用来制备金属微球, 适合于制备较大直径的厚壁金属微球和均匀掺杂的金属微球, 可用来制备均匀掺杂的 Be(Cu) 靶丸. 本方法制备的金属微球球壳阻气性能和强度非常优越.

3.3 炉内成球技术

利用立式高温炉直接成球, 是制备玻璃球的常规方法. 在点火靶的候选靶丸中, 以陶瓷先驱体为原料, 利用高温炉可制备碳化硅和碳化硼等靶丸 [11].

4 点火靶丸分类

4.1 辉光放电等离子体聚合物靶丸

4.1.1 辉光放电等离子体聚合物靶丸的特点

利用降解芯轴技术,以 PAMS 为芯轴,制备 PAMS/GDP(Ge) 复合微球,热降解去除芯轴后可获得空心 GDP(Ge)^[9,12].也可先制备空心 GDP,再以它为芯轴制备 GDP(Ge).GDP 涂层或球壳的特性如下:(1)涂层主要成分为低原子序数的 C 和 H,密度与常用塑料靶丸材料接近,可用作 ICF 靶丸的烧蚀层材料;(2)成膜温度低,对基底或芯轴影响小;(3)等离子体中的离子所具有的能量尽管比通常热化学反应的能量大,由于等离子体在低压下发生,是热的不平衡态,所以等离子体反应容器及等离子体成膜表面仍能保持近于室温的温度;(4)单体选择范围广,尽管各种单体所含的官能团不同、性质各异,因而聚合速率不一,但从本质上看,即使说各种有机物质都能用作单体进行聚合也并不过分,因此,可根据需要进行掺杂;(5)作为一种“干式”工艺技术运作起来方便灵活,可连续或间歇式地改变工艺条件,因此,可制备不同性能的多层结构膜,或进行梯度掺杂;(6)制备微球表面涂层时采用运动的样品盘,微球涂层较均匀,涂层均匀性不受微球直径限制;(7)壳层的理化性能好,GDP 具有高密度网络结构,且网络的大小和支化度在某种程度上可以控制,这样制成的壳层机械强度、化学稳定性和热稳定性均好.另外,GDP 微球具有红外透明、涂层表面光洁度高且均一性好、内应力较小、阻气性能合适、打靶实验数据较丰富,是许多国家 ICF 点火项目的首选靶丸^[4].

4.1.2 辉光放电等离子体聚合物靶丸制备研究进展

在 ICF 制靶中,GDP 涂层最早应用于具有多层结构的聚合物靶丸,内部是几个微米的支撑层聚苯乙烯,中间是几个微米的阻气层聚乙烯醇,外层为 GDP.GDP 涂层厚度几个微米到几十微米,个别靶型超过 100 μm .美国 NOVA 装置常用靶丸规格为:直径 420—460 μm ,总厚度 15—62 μm ,总壁厚不均匀性(最大壁厚与最小壁厚差)小于 3 μm ^[13].国内神光 II 装置使用的靶丸直径 200—300 μm ,总厚度为 11—30 μm ,总壁厚不均匀性小于 1.5 μm ^[14—17].

美国通用原子公司 (General Atomic, 简记为 GA) 采用乳粒发生器技术制备 PAMS 芯轴微球^[18],PAMS 原料分子量 40 万,直径为 2—2.5 mm 的微球球形偏离度 (out-of-round, 简记为 OOR) 约 0.4 μm ,不同心度 (non-concentric, 简记为 NC) 约 0.3%.在芯轴表面制备掺杂 GDP 涂层,涂层的碳氢比例 1 : 1.4,密度为 1.08—1.10 g/cm^3 ,原子百分比 0.38% 的 Ge 掺杂密度为 1.12 g/cm^3 ,0.75% 的掺杂密度为 1.18 g/cm^3 .PAMS/GDP(Ge) 复合微球在 305 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温 10—20 h 可热降解去除 PAMS 芯轴得到 GDP(Ge),降解过程中,GDP 球壳直径收缩约 0.4%,壁厚减少约 5.7%,Ge 掺杂浓度没有变化,内表面光洁度均方根值为 1.1—6.5 nm^[12,19].目前,美国已有能力制备满足点火要求的梯度掺杂 GDP(Ge) 靶丸,美国 GDP(Ge) 点火靶丸 3.1 版本结构见图 1.在版本 5 中 GDP(Ge) 壳层设计厚度为 190 μm ,Ge 原子百分比浓度最大为 1.0%^[20].美国劳伦斯利弗莫尔实验室 (Lawrence Livermore national laboratory, 简记为 LLNL) 最新打靶实验表明孤立缺陷对表面质量影响严重^[21],后续研究重点将是减少上述缺陷的尺寸和数量.我国在 GDP 靶丸烧蚀层制备技术方面起步较晚,主要开展了涂层厚度研究、单体流量影响、薄膜组成与强度、弹跳模式对表面影响、涂层掺杂等实验工艺研究,芯轴和降解的工作也处在起步阶段^[22—24].

4.1.3 辉光放电等离子体聚合物靶丸制备关键技术

采用降解芯轴技术制备空心 GDP 微球,主要涉及三个方面的关键技术:高质量 PAMS 芯轴微球制备、GDP 涂层和 PAMS/GDP 复合微球降解去除芯轴.PAMS 微球制备主要技术是控制 PAMS 微球的直径,降低微球的 OOR 和 NC,提高微球表面质量,尤其是解决微球表面在模数 10 附近的质量偏差问题.PAMS/GDP 复合微球降解工艺重点在于得到的 GDP 微球内表面无残留,残留的降解产物将直接影响后续分层的冰层质量.

在 GDP 涂层方面,关键技术包括掺杂水平、涂层厚度和均匀性控制,提高球壳强度,以及减少缺陷,改进表面质量等^[25—30].GA 研究人员在不断优化工艺的基础上,制备了高强度的 GDP 微球^[9,25,26].高强度的 GDP 微球杨氏模量超过 2.3 GPa,偶尔也可制备出杨氏模量超过 3.0 GPa

的微球. 与此相对应, 相当于微球直径 900 μm , 壁厚 1.0 μm , 耐外压能力为 14 kPa. 高强度 GDP 薄膜中碳氢比例为 1 : 0.89, 氧的含量为 5.5%, 密度为 1.40 g/cm^3 . 常规 GDP 微球耐压能力为 5—7 kPa. 提高 GDP 微球表面质量一直是制备方面关注的问题. 影响 GDP 微球表面光洁度的因素主要有四个方面: 制备参数、微球运动方式、芯轴质量和环境清洁度 [27—30]. 涂层工艺本身可以制备高质量的表面, 调整到合适的工艺参数可以在非常光洁的表面上制备出光洁度到几个纳米的薄膜, 薄膜的厚度可以超过 100 μm . 芯轴表面质量和降解芯轴的过程对 GDP 微球表面质量影响很大, 在模数 2—20 范围内, GDP 微球表面质量与 PAMS 芯轴表面状况完全相关 [15], 如果制备薄壁 GDP 微球, 降解过程将可能导致 GDP 微球低模数表面功率谱明显增大. 芯轴表面缺陷、涂层过程微球碰撞及环境清洁度是 GDP 微球表面产生孤立缺陷的主要原因. 通过摇动或滚动方式, 尽量减少微球间的碰撞可以有效改善微球的表面质量. 美国近期的打靶实验及理论模拟均对孤立凸起提出了更严格的要求, 如图 3 所示 [20], 其中严格规定了实验允许的最大凸起尺寸. 较大凸起将引起燃料混合, 不利于点火实验.

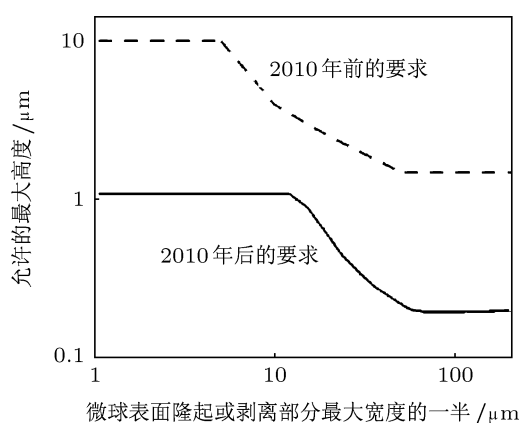


图3 GDP靶丸表面凸起要求

4.2 金属铍靶丸

4.2.1 Be靶丸的特点及制备研究进展

Be及掺杂Be靶丸透明度高、耦合效率高, 因此, 可以采用较低的辐射驱动温度. Be靶丸烧蚀稳定性好, 相对而言对靶丸和DT冰层粗糙度带来的不稳定性不是很敏感; 材料导热系数高, 易于DT冰层匀化; 球壳抗拉强度高, 如果采用注入法高压充

气, 冷冻前高压充气靶丸可在室温条件下放置; 燃料注入方式采用充气管时对打靶实验影响较GDP靶丸要小. Be靶丸最主要的缺点是制备难度大, Be材料有毒, 制备过程需要防护, 属于受控材料; 靶丸表面需要抛光; 制备过程中需要控制微结构和减少缺陷; Be壳层对可见光和红外不透明, 内表面表征方法有限, 而且冰层不能采用红外均化 [4,5,31—34].

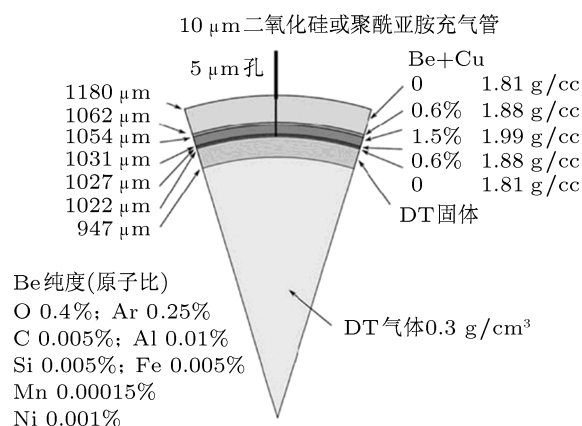


图4 铍靶丸版本5参数及结构示意图

Be及掺杂Be微球的制备方法有两种: 半球加工复合和降解芯轴技术 [10,32,33]. 半球加工复合技术可利用块体材料直接加工成带直口半球, 两个半球在高温高压下热复合成为一个完整的球壳, 也可先加工两内半球, 复合后再加工外半球. 半球复合的关键技术是半球加工和热复合工艺. 制备的Be球机械强度高、保气性能好, 还可以采用复合原位充入高压燃料气体或掺杂气体. 半球复合法可制备直径约 2 mm, 壁厚达到点火靶要求的纯Be球或均匀掺杂Be(Cu)球, 尺寸误差约 0.5 μm , 表面光洁度优于 100 nm, 但不能制备点火靶设计的梯度掺杂Be(Cu) [10]. 芯轴微球表面制备Be涂层和掺杂涂层主要采用磁控溅射法, 也有人尝试采用化学气相沉积方法 [33]. 美国 LLNL 和 GA 采用磁控溅射结合降解芯轴技术制备梯度掺杂Be(Cu)靶丸. 与降解芯轴技术制备GDP靶丸相比, 制备Be靶丸在去除芯轴前还必须进行微球打孔和微球表面抛光 [34,35]. 美国Be基点火靶靶丸结构设计见图4(版本5) [21], Be层厚度 158 μm , 梯度掺杂Cu, Cu原子百分比浓度分别为 0.6%和 1.5%. 目前, 美国制备的Be(Cu)靶丸接近体密度的 95%, 缺陷体积不超过 0.1 μm^3 , 表面光洁度能达到 20 nm, 掺杂层厚度偏差和浓度偏差约 10%. 新制备的复合Be(Cu), 含

氧量约 1%, 接近点火靶 0.4% 的要求, 但去掉芯轴后, 含氧量增加很多, 如果以薄壁 Be 球壳为芯轴制备 Be(Cu) 可能减少氧气的引入. 国内 Be 微球制备工作还在起步阶段, 目前未见公开报道.

4.2.2 制备 Be 靶丸的关键技术问题

采用磁控溅射结合降解芯轴制备 Be(Cu) 靶丸的关键技术包括: 选择合适的芯轴, 复合微球打孔和降解芯轴, 提高球壳阻气性能、壳层密度、外表面光洁度和光学厚度均匀性, 以及掺杂水平、缺陷尺寸和缺陷体积的控制等.

制备 Be(Cu) 涂层候选芯轴主要有四种: PAMS, GDP, 镍和硅球^[36]. PAMS 降解温度低, 容易去除, 但玻璃化转变温度相对较低, 在溅射法制备 Be(Cu) 层时, 目标微球可能出现形变. 降低溅射功率和采用实心 PAMS 有助于改善壳层质量. 镍及实心 PAMS 作芯轴, 制备的 Be(Cu) 壳层容易出现开裂, 原因主要来源于壳层应力. 镍及硅芯轴去除可能达不到 100%, 而且可能存在内表面腐蚀或 Be 壳层氧化. GDP 芯轴是目前最常用的, 涂层过程中建议温度不超过 300 °C, 降解最高温度一般为 425 °C^[32,35].

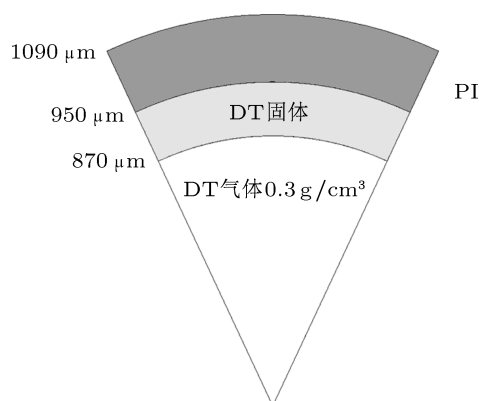


图 5 PI 点火靶丸示意图

Be 涂层在制备过程中可能出现节瘤状生长与扭曲生长, 不仅会降低 Be 涂层的密度, 而且会导致涂层表面粗糙度随厚度的增加而急剧增大. Xu 等^[32]研究表明, 采用弹跳模式和较高的沉积速率, 得到的是扭曲柱状生长结构, 密度也较低 (80% 体密度), 缺陷最大尺寸超过 500 nm; 采用滚动模式和较低沉积速率, 得到的是均匀柱状生长结构, 密度较高 (95% 体密度), 缺陷最大尺寸不到 200 nm. 改进后的柱状生长仍存在较多的孔隙或晶界缺陷, 从

而降低微球的保气性能. 点火靶丸要求低温保气半寿命大于 7 天, 磁控溅射制备的 Be 球保气性不好, 保气半寿命仅几分钟到几个小时, 如果引入 B, 则可提高保气性能. 在 Be(Cu) 靶丸壳层内部制备两层 0.25 μm 厚的非晶 Be(B), 可起到阻气作用, 保气半寿命可提高到几天到几周^[37].

4.3 其他候选靶丸

4.3.1 PI 靶丸

PI 靶丸制备方法与 GDP 靶丸类似, 环化过程与热降解去除芯轴同时进行. 利用真空气相沉积技术在芯轴微球表面制备聚酰胺酸涂层, 聚酰胺酸涂层由二酐和二胺单体同时蒸发生成. 二酐和二胺的多样性将决定 PI 的多样性. 采用两种单体共沉积技术制备 PI 球, 两种单体化学计量比严格要求为 1 : 1, 这是制备中的一个难点, 国外已基本解决^[38,39], 国内的研究刚刚起步^[40]. PI 点火靶丸结构示于图 5^[5], 分子结构为 $C_{22}H_{10}N_2O_4$, 密度 1.5 g/cm³. PI 靶丸具备优异的机械性能, 制备点火靶时, 球壳强度允许充高压燃料靶丸进行室温存储和转移, 球壳阻气性能合适, 可根据需要进行调整; 热导率高, 在制备冷冻靶时可以快速冷却; 大部分 PI 材料对可见光都是透明的, 便于冰层的表征, 在制备冷冻靶时可使用红外分层. 但 PI 靶丸含氮和氧较多, 也需要较高的烧蚀温度 (350 eV), 不利于激光与等离子体相互作用的稳定性. 国外 PI 靶丸制备工作开始于 1997 年, 研究内容包括 PI 涂层、芯轴降解、不同单体选择、球壳渗透性能、氘代聚酰亚胺性能以及后处理提高表面光洁度等^[38-42]. GA 的 Chen 和 Nikroo^[42] 以及 LLNL 的 Letts 等^[41] 制备的 PI 微球, 在模数 11—1000 段表面光洁度优于 7 nm, 已经达到了点火靶的设计要求.

4.3.2 金刚石靶丸

金刚石靶丸又称高密度碳靶丸, 点火靶丸结构如图 6 所示. 采用化学气相沉积在硅芯轴表面制备金刚石涂层, 打孔去除芯轴后得到空心金刚石靶丸. 金刚石靶丸具有高强度、高硬度、高 (原子数) 密度、高热导性等优异特性, 可高压充气, 比 Be 具有更高的耦合效率, 对可见光和红外透明, 适于多种燃料分层和表征方法, 对 DT 冰层内表面粗糙度要求低. 在高模数段 (大于 20) 金刚石靶丸比 Be

对 DT 的要求降低一半以上. 金刚石烧蚀过程复杂, 实验数据较少, 物理认识不充分, 要求具有比 Be 靶丸更高的外表面光洁度. 新制备的金刚石微球表面粗糙度达到了 $2\ \mu\text{m}$, 抛光后可降低到 $200\ \text{nm}$, 在厚的金刚石薄膜表面抛光后可达到 $20\ \text{nm}$ ^[43], 靶丸表面质量问题目前并未完全解决.

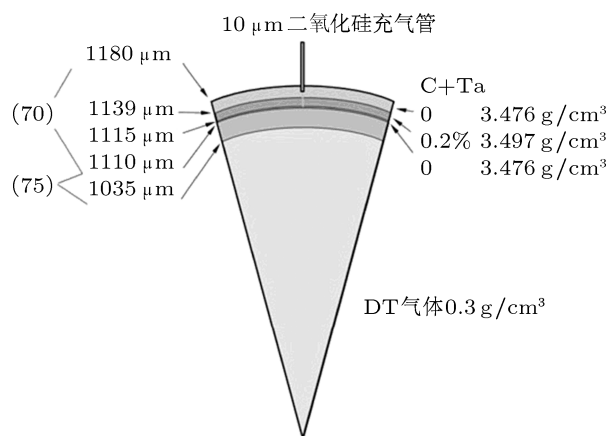


图6 金刚石点火靶丸示意图

4.3.3 碳化硼

碳化硼作为点火靶的另一种候选靶丸, 具有高强度、高硬度、气体渗透系数可通过实验调节、不掺杂、烧蚀比较稳定等特点. 制备涂层时沉积速率偏低, 比 Be 的沉积速率低 3—7 倍^[44]. 碳化硼仅在理论模拟方面探讨了作为点火靶靶丸的可行性, 制备方面研究较少.

5 候选靶丸比较及发展

美国最初的点火靶设计为 CH(Br) 靶丸^[2,45], 但进一步的理论模拟研究表明内爆过程中界面混合非常严重. 1995 年后, 在理论上探讨了多种点火靶候选靶丸, 其中重点是 PI 靶丸和掺 Cu 的 Be 靶丸, 同时研究了掺杂对靶丸性能的影响. Dittrich 等的研究表明^[4,46,47], 对于 CH 和 Be 靶丸, 梯度掺杂优于均匀掺杂, 均匀掺杂优于不掺杂; Be(Cu) 靶丸性能优于 PI 靶丸, PI 靶丸优于 CH(Br) 靶丸. 驱动温度 $300\ \text{eV}$, 驱动能量 $1.3\ \text{MJ}$, Be(Cu) 和 PI 靶丸表面粗糙度要求为 $50\text{—}80\ \text{nm}$, CH(Br) 靶丸表面粗糙度要求为 $20\ \text{nm}$, 模拟结果示于图 7. 另外,

Be(Cu) 靶丸冰层粗糙度为 $1.0\ \mu\text{m}$, PI 和 CH(Br) 靶丸冰层粗糙度为 $0.5\ \mu\text{m}$. 1996—2006 年, 点火靶候选靶丸制备重点为磁控溅射法制备梯度掺 Cu 的 Be 靶丸, 以及 PI 靶丸和梯度掺杂 GDP(Ge) 靶丸. 因 PI 烧蚀性能实验与理论模拟相差较多, 2007 年后选择了金刚石靶丸作为第三候选靶丸. 考虑到烧蚀特性, 这期间比较倾向于采用 Be 靶丸为点火靶的首选靶丸. 后来研究发现, 采用不同驱动温度后, CH 靶丸在 $300\ \text{eV}$ 与 Be 靶丸在 $285\ \text{eV}$ 具有一定的可比性. 从靶丸制备结果看, GDP(Ge) 和 PI 靶丸已基本达到点火靶要求, Be(Cu) 靶丸在掺杂和杂质控制方面还需进一步改进, 金刚石靶丸与点火靶要求差距还较大.

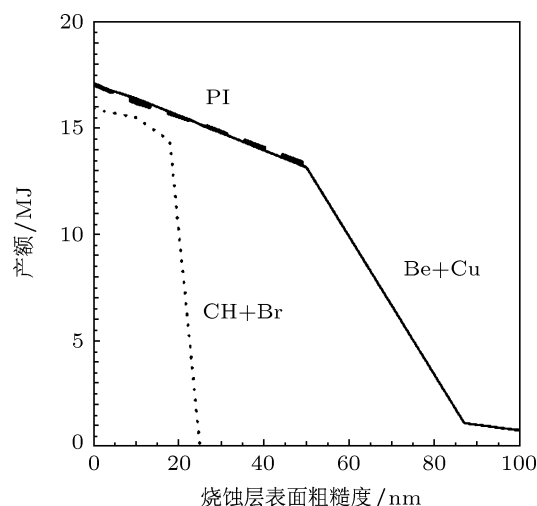


图7 几种候选靶丸表面粗糙度要求比较

6 结论

综合考虑候选靶丸的物理性能尤其是在点火实验中的烧蚀性能, 以及靶丸制备难度和现状, 美国 NIF 装置上点火靶的首选靶丸为梯度掺杂的 GDP(Ge) 靶丸, 其次为 Be(Cu) 靶丸; 欧洲 LMJ 装置上点火靶的首选靶丸为 GDP(Ge) 靶丸. 在国内研究方面, GDP 涂层和 PAMS 芯轴微球制备已具有一定的工作积累, 相比 Be(Cu) 靶丸对实验室及制备工艺的苛刻要求, GDP(Ge) 可能是最早用于点火条件实验的靶丸, 也可能最早达到点火实验对靶丸的要求.

- [1] Tabak M, Hammer J M, Glinsky M E 1994 *Phys. Plasmas* **1** 1626
- [2] Lindl J D 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [3] Haan S W, Callahan D A, Edwards M J 2009 *Fusion Sci. Technol.* **55** 227
- [4] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2003 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [5] Dittrich T R, Haan S W, Pollaine S, Burnham A K 1997 *Fusion Technol.* **31** 402
- [6] Dittrich T R, Haan S W, Marinak M M, Pollaine S M, McEachern R 1998 *Phys. Plasmas* **5** 3708
- [7] McQuillan B W, Nikroo A, Steinman D A, Elsner F H, Czechowicz D G, Hoppe M L, Sixtus M, Miller W J 1997 *Fusion Technol.* **31** 381
- [8] Fearon E M, Letts S A, Allison L M, Cook R C 1997 *Fusion Technol.* **31** 406
- [9] Nikroo A, Pontelandolfo J M 2000 *Fusion Technol.* **38** 58
- [10] Margevicius R W, Salzer L J, Salazar M A, Foreman L R 1999 *Fusion Technol.* **35** 106
- [11] Zhang Z W, Li B, Tang Y J, Wanh C Y, Chen S F, Qi X B 2005 *J. Chin. Ceramic Soc.* **33** 1085 (in Chinese) [张占文, 李波, 唐永建, 王朝阳, 陈素芬, 漆小波 2005 硅酸盐学报 **33** 1085]
- [12] Chen K C, Cook R C, Huang H, Letts S A, Nikroo A 2006 *Fusion Technol.* **49** 750
- [13] Brusasco R, Saculla M, Cook R 1995 *J. Vac. Sci. Technol. A* **13** 948
- [14] Du K, You D, Zhang L, Zhou L, Lin B 1998 *High Power Laser and Particle Beam* **10** 426 (in Chinese) [杜凯, 游丹, 张林, 周兰, 林波 1998 强激光与离子束 **10** 426]
- [15] Zhang L, Tang Y J, Gao D Z, You D, Tu H Y, Luo X 2001 *Atomic Energy Sci. Technol.* **35** 427 (in Chinese) [张林, 唐永建, 高党忠, 游丹, 涂海燕, 罗炫 2001 原子能科学技术 **35** 427]
- [16] Huang Y, Wu W D, Wei S, Luo J S, Zhang J C, Zhang Z W 2002 *Atomic Energy Sci. Technol.* **36** 343 (in Chinese) [黄勇, 吴卫东, 魏胜, 罗江山, 张继成, 张占文 2002 原子能科学技术 **36** 343]
- [17] Zhang Z W, Huang Y, Tang Y J, Li B, Chen S F, Liu Y Y 2008 *Atomic Energy Sci. Technol.* **42** 284 (in Chinese) [张占文, 黄勇, 唐永建, 李波, 陈素芬, 刘一杨 2008 原子能科学技术 **42** 284]
- [18] Takagi M, Cook R, McQuillan B, Gibson J, Paguio S 2004 *Fusion Technol.* **45** 171
- [19] Theobald M, Chicanne C, Barnouin J, Peche E, Baclet P 2006 *Fusion Technol.* **49** 757
- [20] Haan S W, Salmonson J D, Clark D S, Ho D D, Hammel B A, Callahan D A, Cerjan C J, Edwards M J, Hatchett S P, Landen O L, Lindl J D, Macgowan B J, Marinak M M, Munro D H, Robey H F, Spears B K, Suter L J, Town R P, Weber S V, Wilson D C 2010 *Fusion Technol.* **59** 1
- [21] Chicanne C, Bray J, Peche E, Legay G, Theobald M, Legaie O, Ollagnier A, Finotb E 2010 *Fusion Technol.* **59** 87
- [22] Wu W D, Luo J S, Zhang Z W, Huang Y 1999 *Atomic Energy Sci. Technol.* **33** (in Chinese) [吴卫东, 罗江山, 张占文, 黄勇 1999 原子能科学技术 **33** 319]
- [23] Yang Z L, He Z B, Song Z M, Lu T C, Zhang B L, Tang Y J 2010 *High Power Laser and Particle Beam* **22** 1044 (in Chinese) [阳志林, 何智兵, 宋之敏, 卢铁城, 张宝玲, 唐永建 2010 强激光与离子束 **22** 1048]
- [24] Zhang Z W, Huang Y, Tang Y J, Li B, Chen S F, He Z B 2009 *Atomic Energy Sci. Technol.* **43** 457 (in Chinese) [张占文, 黄勇, 唐永建, 李波, 陈素芬, 何智兵 2009 原子能科学技术 **43** 457]
- [25] Czechowicz D G, Castillo E R, Nikroo A 2002 *Fusion Technol.* **41** 188
- [26] Chen K C, Moreno K A, Lee Y T, Wu J J, Nguyen Q L, Huang H, Sequoia K, Nikroo A 2009 *Fusion Technol.* **59** 8
- [27] Theobald M, Dumay B, Chicanne C, Barnouin J, Legaie O, Baclet P 2004 *Fusion Technol.* **45** 176
- [28] Nikroo A, Pontelandolfo J M, Castillo E R 2002 *Fusion Technol.* **41** 220
- [29] Chen K C, Nguyen A Q, Huang H, Eddinger S A, Nikroo A 2009 *Fusion Technol.* **55** 429
- [30] Clark D S, Haan S W, Hammel B A, Salmonson J D, Callahan D A, Town R P J 2010 *Phys. Plasmas* **17** 052703
- [31] Mceachen R, Alford C, Cook R, Makowiecki D, Wallace R 1997 *Fusion Technol.* **31** 435
- [32] Xu H W, Alford C S, Cooley J C, Dixon L A, Hackenberg R E, Letts A A, Moreno K A, Nikroo A, Wall J R, Youngblood K P 2007 *Fusion Technol.* **51** 547
- [33] Salazar K V, Pattillo S G, Trkula M 2000 *Fusion Technol.* **38** 69
- [34] Lundgren E H, Forsman A C 2009 *Fusion Technol.* **55** 325
- [35] Youngblood K P, Moreno K A, Nikroo A, Huang H, Lee Y T, Letts S A, Alford C S, Buckley S R 2007 *Fusion Technol.* **51** 572
- [36] Bhandarkar S, Letts S A, Buckley S, Alford C, Lindsey E, Hughes J, Youngblood K P, Moreno K, Xu H, Huang H, Nikroo A 2007 *Fusion Technol.* **51** 564
- [37] Nikroo A, Xu H W, Moreno K A, Youngblood K P, Cooley J, Alford C S, Letts S A, Cook R C 2007 *Fusion Technol.* **51** 553
- [38] Sanchez J J, Letts S A 1997 *Fusion Technol.* **31** 491
- [39] Alfonso E L, Tsai F Y, Chen S H, Gram R Q, Harding D R 1999 *Fusion Technol.* **35** 131
- [40] Huang Y, Zhang Z W, Liu Y Y, Li B, Chen S F, Qi X B 2011 *High Power Laser and Particle Beam* **23** 1527 (in Chinese) [黄勇, 张占文, 刘一杨, 李波, 陈素芬, 漆小波 2011 强激光与离子束 **23** 1527]
- [41] Letts S A, Fearon E, Anthamatten M, Buckley S R, King C, Cook R 2006 *Fusion Technol.* **49** 714
- [42] Chen K C, Nikroo A 2006 *Fusion Technol.* **49** 721
- [43] Biener J, Mirkarimi P B, Tringe J W, Baker S L, Wang Y, Kucheyev S O, Teslich N E, Wu K J J, Hamza A V, Wild C, Woerner E, Koidl P, Bruehne K, Fecht H J 2006 *Fusion Technol.* **49** 737
- [44] Burnham A K, Alford C S, Makowiecki D M, Dittrich T R, Wallace R J, Honea E C, King C M 1997 *Fusion Technol.* **31** 456
- [45] Haan S W, Pollaine S M, Lindl J D, Suter L J, Berger R L, Powers L V, Alley W E, Amendt P A, Futterman J A, Levedahl W K, Rosen M D, Rowley D P, Sacks R A, Shestakov A I, Strobel G L, Tabak M, Weber S V, Zimmerman G B, Krauser W J, Wilson D C, Coggeshall S V, Harris D B, Hoffman N M, Wilde B H 1995 *Phys. Plasmas* **2** 2480
- [46] Dittrich T R, Haan S W, Marinak M M, Hinkel D E, Pollaine S M, McEachern R, Cook R C, Roberts C C, Wilson D C, Bradley P A, Varnum W S 1999 *Laser and Particle Beams* **17** 217
- [47] Wilson D S, Bradley P A, Hoffman N M, Swenson F J, Smitherman D P, Chrien R E, Margevicius R W, Thoma D J, Foreman L R, Hoffer J K, Goldman S R, Caldwell S E, Dittrich T R, Haan S W, Marinak M M, Pollaine S M, Sanchez J J 1998 *Phys. Plasmas* **5** 1953

Properties and fabrication status of capsules for ignition targets in inertial confinement fusion experiments

Zhang Zhan-Wen[†] Qi Xiao-Bo Li Bo

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

(Received 11 July 2011; revised manuscript received 3 September 2011)

Abstract

The inertial confinement fusion program has proposed a laser capable of producing ignition and gain as the next step. Several choices exist in the design and production of capsules. In this paper the important features of each ablator material and the status of production are summarized. The design consists of ablators made of germanium-doped carbon hydrogen (CH), beryllium doped copper, polyimide, B₄C and diamond. The CH and beryllium capsules are two of the most important choices. Compared with the beryllium shell, the CH shell has no microstructure and has a transparent wall that allows optical characterization of the fuel ice layer. The CH shell has the advantage that the specification can be easy to satisfy the ignition acquirements. The current ignition point has been designed in USA since 2010. The ignition target design has a series of demands for the capsule, such as capsule dimensions, coating density, void defects and volume, surface roughness, uniformity, doping and impurity levels. Now, the CH capsule can meet ignition requirements in USA, while the relevant work has just started in China.

Keywords: inertial confinement fusion, ignition targets, capsules

PACS: 52.57.-z, 52.57.Bc

[†] E-mail: bjzzw1973@163.com