

激光惯性约束聚变靶技术研究

唐永建

(核物理与化学研究所 成都 610003)

摘要 本文简要叙述了近年来中物院核物理与化学研究所开展激光惯性约束聚变靶技术研究的进展情况,围绕热核聚变靶丸的研制,介绍了空心玻璃微球(HGM)、塑料微球(HPM)的制备结果和充氘氚燃料气体的技术.在参数测量方面重点介绍了燃料气体的测量和荧光分析法的结果,鉴于低温冷冻靶是制靶技术的重要课题,文中也简叙了该技术的国内外动态.

关键词 激光惯性约束聚变(ICF), DT 内爆靶丸, 低温冷冻靶, ICF 靶制备技术.

1 引言

激光惯性约束聚变(ICF)研究中,靶制备技术起着重要的作用,它大到聚变反应堆的材料制备、工艺研究,小到亚毫米的靶丸技术研究,所以,国际上凡是有能力进行 ICF 研究的国家都把进行靶的制备研究作为一项关键技术来抓^[1]. ICF 靶技术分为材料、精密微工艺和参数测量三大组成部分,其中材料研究分为:靶装配材料、激光吸收与转换材料、热核聚变燃料、物理诊断示踪材料、压缩、高密度内爆靶丸壳材料及激光等离子体物理基准实验材料等内容;精密微工艺和参数测量包括:靶丸制备技术、微米、亚微米靶零件加工工艺,以及各种靶材料、靶结构和纳米、亚纳米薄膜及粉末测量技术,经10多年的努力,我所在 ICF 靶技术方面取得了长足的进展,先后研制成以玻璃为壳材料的激光直接驱动内爆靶丸和具有复杂结构的间接驱动内爆靶.同时,还研制成上百种不同类型、不同结构、不同材料的激光等离子体物理实验和 ICF 靶物理研究用靶.材料研究方面,也相继研制成密度为 $40\sim 50\text{mg}/\text{cm}^3$ 的聚苯乙烯泡沫材料、 $(0.5\sim 5)\%$ 原子比的聚苯乙烯及低密底的泡沫金属和 SiO_2 泡沫材料.目前,正在进行双层以及多层 D 化或未 D 化的塑料微球球壳的研究.几年来做了大量的工作.目前已备有表面加工精度达到 25nm 的超精密微加工车床、表面光洁度为 $\sim 100\text{nm}$ 的玻璃微球制备系统和

金属涂层系统,建立了以超临界萃取仪与凝胶色谱仪为核心的泡沫材料实验室,和以分子束悬浮镀膜、双枪电子束蒸发和射频磁控溅射等设备为主的薄膜实验室.同时还建立了以扫描电子显微镜、X 光能谱仪、Leitz 干涉仪和 X 光微焦斑照像设备为主的靶参数测量实验室.相信,在今后几年内我所的 ICF 靶制备能力还将有很大的提高.

2 聚变靶丸

按靶物理设计的要求,激光聚变靶的热核燃料容器必须具有高球形度、高表面光洁度、高抗张力强度、均匀性好且能在较长时间内保存住热核燃料等性能.要制备出符合上述特性的燃料容器,需要发展专门的制备技术和方法.

1990年以来,相继建立了制备空心玻璃微球(HGM)的多区高温液滴炉、热扩散法氘氚充气系统及 DT 微球几何参数、DT 密度等测量仪器和方法,成功地制备了满足 LF-12 强激光装置上各种内爆物理实验所需的聚变靶丸,取得了间接驱动中子产额约 10^4 的好结果.除上述类型外,还利用微封装法,制备了空心塑料微球,今后还将进行空心泡沫塑料微球和空心凝胶溶胶玻璃微球的研制,靶壳材料也将使用 D 化、T 化以及溴化的聚苯乙烯材料.

2.1 空心玻璃球壳的制备(HGM)

激光核聚变研究对空心玻璃微球球壳的

要求很高,其中:球形度好于99%,同心度好于97%,壁厚均匀性好于95%,表面光洁度好于100nm.由于激光能量的限制,HGM(Hollow Glass Microsphere)不能很大,一般在毫米和亚毫米量级,壁厚为1~5 μm ,形状因子(直径与壁厚之比)为15~1000.上述规格制

备空心玻璃微球从技术上讲有两种途径,即干凝胶法(1977年由美国 Doletzky 等人提出)和液滴法(1978年由 Rosencwaig 等人提出^[2]).而我们采用了液滴法制备空心玻璃微球的途径.图1是由原成都科技大学和我所联合研制的多区高温液滴炉示意图.

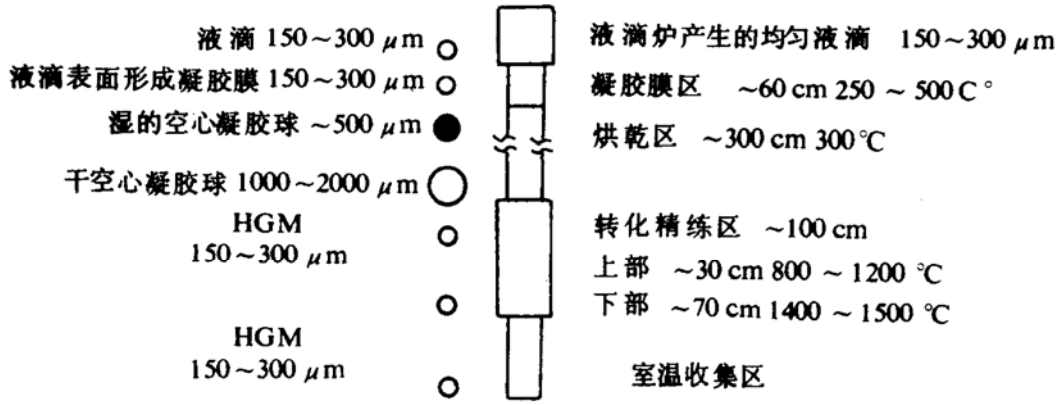


图1 多区液滴炉原理

从图中可以看出液滴炉由5个部分组成,即:液滴产生器、表面封装区、烘乾区、转化精练区、收集区.利用该装置制成壁厚1~4 μm 、直径100~300 μm 、壁厚均匀性好于10%、表面光洁度100nm、保氢寿命>365d的空心玻璃微球.

2.2 塑料球壳的制备

塑料因原子序数低、辐射自由程长和密度较玻璃小是 ICF 研究中最理想的 DT 容器,也是国际上研究最多的一种容器,其主要方法有喷雾干燥法、界面聚合法^[3]、双喷嘴液滴法^[4]及微封装乳液法.按国内实际情况,先开展了微封装乳液法制备聚苯乙烯塑料微球的工作.塑料作为聚变靶丸的优点很明显,但有材料本身的缺点,如球壳具有较小的抗张强度,对氢同位素气体有较高的渗透率,以及成球质量不如 SiO₂高.选择聚苯乙烯材料考虑了上述因素.但该材料也不是最佳的,它对氢同位素的渗透率很高,难于长时间控制住热核燃料,因此,还不能直接用它作为燃料容器.为克服这种缺点,还必须在聚苯乙烯球壳表面涂敷一层氢同位素低渗透率的材料.

采用微封装法工艺已获得了单壳聚苯乙烯空心微球,如图2所示.其中微球直径为100~300 μm ,壁厚2~8 μm ,球形度好于95%,同心度好于91%,表面光洁度可达240nm.随着工作的开展,我们将进行 CH+PVA+PS 多层球壳的研制.

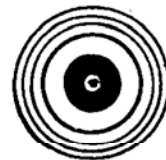


图2 空心塑料微球干涉图

2.3 聚变燃料气体充气工艺

为了在空心玻璃微球中注入热核燃料气体,我们建立了一个~100atm的氘氟充气系统^[5].系统中 LaNi₅和铀床用于氘氟气体增压作用.由于 LaNi₅氢化物在室温下的平衡压力为3.03×10⁵Pa,铀氢化的室温平衡压力为1.0×10⁻⁵Pa,随温度升高压力增加.因此,实验中选用了铀氢化物作低压泵,LaNi₅氢化物作为高压泵,系统温度设在200℃时便可获得

1.79×10⁷Pa 的气压,该气压是目前神光装置激光惯性约束聚变研究中需要的最高气压.在此气压下装置的泄漏率为2.8~3.2×10⁻⁴ Pa·l/s.

2.4 HGM 聚变靶丸参数测量

聚变靶丸有两大参数需精确测量,一是 HGM 的几何参数、表面光洁度及同心度等;二是氘氚气体总量.目前,已建立了以光学测量显微镜、Leitz 干涉显微镜和电子扫描电镜为主的 HGM 几何参数测量仪器,建立了正比计数器、Si(Li)X 射线能谱仪及可见光荧光

分析等破坏与非破坏性氘总量的测量仪器和方法.采用条纹位移法测量了 HGM 的壁厚、偏心度及表面光洁度,其中壁厚测量精度小于30nm,表面光洁度测量精度好于100nm.在精密靶参数测量研究中,目前已用到 SEM(电子扫描电镜)、STM(扫描隧道显微镜)、AFM(原子力显微镜)以及它们的组合使用测量形式,测量精度可达亚纳米范围内.

DT 燃料测量分为两种形式,一种为破坏性测量,一种为非破坏性测量,破坏性测量方法常采用正比计数管和气泡法,破坏性方法可

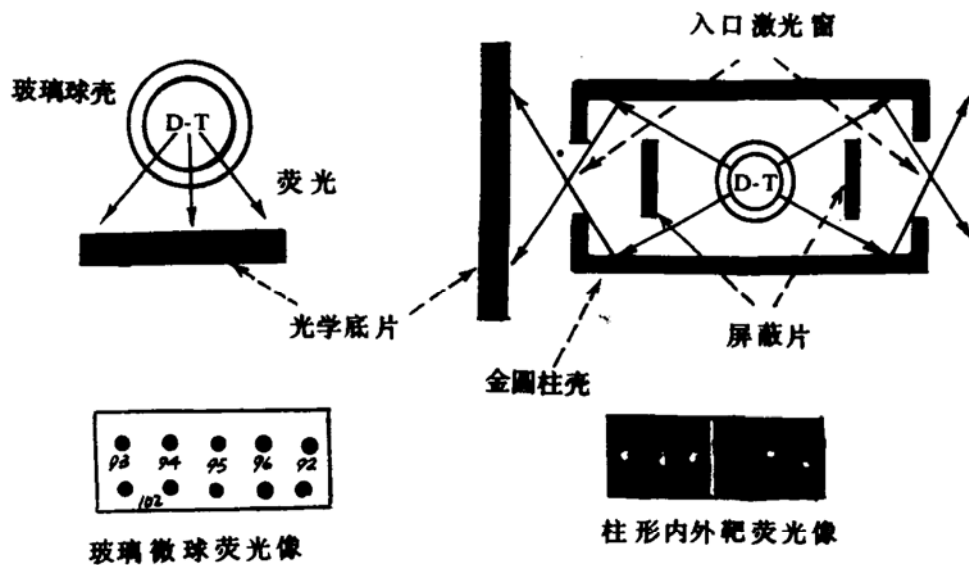


图3 荧光分析法测量图

进行 DT 量的绝对测量,缺点是测量后的靶丸不能再使用,而非破坏性测量方法利用破坏性方法作为绝对测量的刻度.建立的 Si(Li)低能 X 射线能谱仪测量系统,通过测量 β 电子与 HGM 的壳相互作用而产生的 $K\alpha$ 线(1.74keV 的 X 射线)来确定氘量的多少,然后再根据充气时的 DT 混合比例以及氘的衰变特性来估算 DT 气体总量.该系统测量误差可达2%,而荧光分析法,是利用氘的 β 电子与玻璃壁相互作用损失能量产生可见光荧光来监测靶丸内氘量的变化情况,该方法是根据神光实验的环境和条件提出来,并已用于打靶现场间接驱动靶的氘量变化监测.该办法最大好处是简单、方便、结果直观,并

且是唯一能直接观测具有复杂结构间接驱动靶的测量手段.图3是测量原理及结果.

3 低温冷冻靶技术

无论是能源研究还是实验室核武器模拟,低温冷冻靶都是一种十分重要的靶.在技术上低温冷冻靶是一个难度很大涉及范围很广的一门综合性科学,它不但涉及到材料研究控制技术、低温物理、核物理和原子分子物理,而且还涉及到精密微加工技术.目前,国际上研究得最多的是美国 LLNL(利弗莫尔)、LANL(洛斯阿拉莫斯)、KMS(聚变公司)、日本大坂大学、俄罗斯 LPI(利别捷夫物

理所)、罗切斯特大学、Arzamas(俄罗斯实验物理所)。低温冷冻靶的主要工艺就是将约1500大气压的DT气体或DD气体充入聚变靶丸,在液氮低温环境下进行冷冻,并在靶丸内部形成一层均匀分布的DT冰,这种靶一方面可以增加热核燃料的密度,另一方面可获得高压压缩度(低熵压缩)。它的研究始于70年代末,当时遇到的最大困难是如何克服引力效应使冷冻燃料层分布均匀。解决这一问题的方法有几种,其中,1978年美国Miller提出了快速等温冷冻法(FIF)^[6],但此法克服不了液相中燃料的自塌陷现象。1985年美国Kim等人提出了非接角式热梯度方法^[7],克服了由引力引起的燃料自塌现象。制备出了靶丸内表面具有一定厚度且均匀的液体燃料层冷冻靶。1986年Harling提出了泡沫冷冻靶的制备方法和技术,拓宽了冷冻靶制备的材料研究新领域。1988年美国洛斯阿拉莫斯的Hoffer和Foreman又提出了另一种冷冻方法,即氘 β 衰变时的热分层技术(简称 β 分层技术)^[8],该方法可以在靶丸表面形成很厚(约120 μm)且分布均匀的氘氚冰,此法被认为是目前最有前景的方法。然而, β 分层方法和技术只是针对氘燃料而言,而对无放射性氚或其它燃料,1993年日本大坂大学的中国

学者C. M. Chen等提出了用射频等离子体加热的方法使DD冰如DT冰分层的技术。这样冷冻靶的均匀冷冻方法已基本解决。剩下来就是一些与打靶或物理实验有关的工程问题以及靶壳制备、材料选择、表面涂层、测量等技术,实际上这些问题也都取得了很大进展。我所目前正在积极筹建低温冷冻靶实验室,已先后在低温靶泡沫材料、靶丸制备及高压充气方面进行了准备并取得了进展。到2003年,神光Ⅲ号激光器建立之后,有可能进行首次冷冻靶物理实验。

参 考 文 献

- 1 Stever H G, et al. 强激光技术进展,上海:上海科学技术文献出版社,1992,1
- 2 Doletzky, et al. 1977 Ann. Rep. Fusion Res, (KMSF inc. Ann Arbor, MI); Rosencwaig, et al. 1978 LLNL Ann. Rep., UCRL-81421, Lawrence Livermore National Laboratory
- 3 Crowley R, Vac J. Sci. & Technol., 1986, A4:1138
- 4 Kubo U, et al. Sci. & Technol., 1986, A4:1134
- 5 姚书久等. 中国核物理学会第四届全国核靶会议论文集,1992
- 6 Miller J R. Adv. Cryog. Eng., 1978, 23:669
- 7 Kim K L Mok, et al. Sci. & Technol., 1985, A3:1196
- 8 Hoffer J K, et al. Phys. Rev. Lett., 1988, 60:1310

Investigation on Inertial Confinement Fusion(ICF) Target

Tang Yongjian

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract The recent developmet of ICF target in our institute is presented in this paper. With regard to the fabrication of thermal nuclear fusion target, the paper reveals the results of the fabrication of hollow glass microsphere (HGM), hollow plastic microsphere and deuterium-tritium gas-filling technique. The results of characterization and fluorencence analysis of fuel gas are also given out. In addition, due to its importance, the paper describes briefly the internal and external developments of cryogenis target.

Key Words . inertial confinement fusion, DT implosion target, cryogenic target, target fabrication.