

# 激光直接驱动内爆 DT 燃料面密度诊断\*

杨洪琼 杨建伦<sup>†</sup> 温树槐 王根兴 郭玉芝 唐正元 牟维兵 马 驰

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 919 信箱 212 分箱 绵阳 621900)

(2001 年 3 月 1 日收到 2001 年 6 月 2 日收到修改稿)

在神光 II 基频光直接驱动内爆实验中, 利用 CR39 径迹探测器测量了 DT 靶丸释放出的 14MeV 中子弹性散射后逃逸出燃料的反冲 D 核和反冲 T 核的数量, 实现了激光聚变实验中燃料面密度  $\rho R$  的诊断. 测量结果表明, 靶面激光照射均匀度对压缩状态具有一定程度的影响, 爆推靶  $\rho R$  低于烧蚀靶  $\rho R$  一个量级左右, 表明烧蚀靶压缩情况比爆推靶好, 过热电子预热严重影响压缩.

关键词: 惯性约束聚变, 等离子体诊断, 燃料面密度, CR39

PACC: 5270, 2940W

## 1 引 言

在磁约束聚变中, 劳逊(Lawson)积  $n\tau$  是很重要的参量; 在惯性约束聚变中, 相应的参量为燃料密度与半径的乘积, 即面密度  $\rho R$ , 它对自加热及燃烧份额具有强烈的影响<sup>[1,2]</sup>, 因此, 诊断  $\rho R$  对于理解激光驱动内爆具有重要的意义. 于是, 在激光惯性约束聚变(ICF)实验中, 燃料面密度  $\rho R$  参量的测定很自然地成为了 ICF 实验靶芯压缩诊断的重要课题.

国外 20 世纪 80 年代已将 CR39 径迹探测器广泛应用于 ICF 实验, 测量聚变产物, 诊断靶芯压缩情况<sup>[3-7]</sup>. CR39 径迹探测器是测量 ICF 实验中的  $\rho R$  参量的候选探测器, 它具有的优点是: 不需要在暗室操作, 照射后处理简单; 对 X 射线不灵敏(可承受约 1Mrad 的剂量); 采用空间符合技术或过滤技术(区分本底和信号), 能谱测量是可能的.

在国内, 神光 II 装置基频光内爆出中子实验, 因为激光能量低, 中子产额、DT 燃料离子温度和面密度都较低, 我们已研究了诊断中子时间行为和燃料离子温度的测量技术<sup>[8,9]</sup>. 根据 CR39 的特点, 测量 ICF 实验中的带电粒子, 如: 测量反冲 D, T 核在 CR39 中形成的径迹, 可推算  $\rho R$  参量.

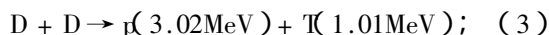
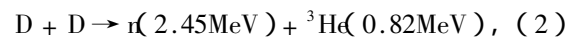
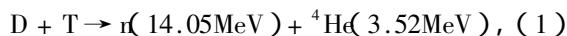
在神光 II 基频光直接驱动内爆实验中, 采用了直径约 200 $\mu\text{m}$  的爆推靶和直径约 500 $\mu\text{m}$  的烧蚀靶

两种等比 DT 薄壳靶(壳厚度约为 1 $\mu\text{m}$ ), 两种靶的充气压力分别约为  $2.03 \times 10^6$  和  $5.07 \times 10^6$  Pa, 激光照射能量分别约为 800J(8 束)/80ps 和 4000J(8 束)/800ps. 利用日本生产的 CR-39 径迹探测器测量了 DT 靶丸释放出的 14MeV 中子弹性散射后逃逸出燃料的反冲 D, T 核的径迹数, 实现了激光聚变实验中燃料面密度  $\rho R$  的诊断.

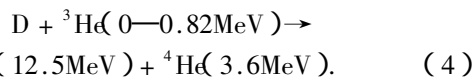
## 2 实验原理

在 ICF 内爆实验中, DT(或 DD)靶丸被压缩、加热到高温高密度状态而发生热核聚变反应, 相应的热核反应方程为

聚变初级反应



聚变次级反应



聚变反应产生的 14.1MeV 中子, 与 D 或 T 核发生弹性散射, 获得反冲 D, T 核, 如图 1 所示.

产生的反冲 D, T 核具有连续的能量, 对于 D, 能量在 0—12.5MeV, 对于 T, 能量在 0—10.6MeV.

测量 DT 中子弹性散射产生的高能 D, T 反冲核的数量<sup>[10-12]</sup>可以诊断  $\rho R$ , D, T 反冲核通常用

\* 国家高技术研究发展计划惯性约束聚变基金(批准号 863-416-3-4.8)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: jlyang@eastmail.com

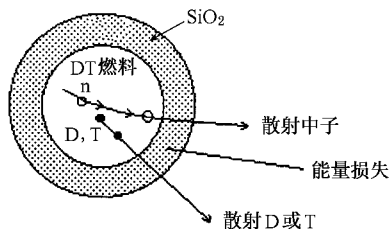


图1 D 或 T 反冲核的形成原理

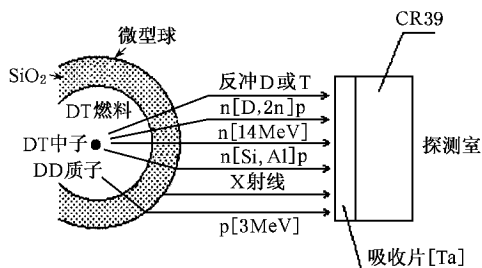


图2 实验原理示意图

CR39 径迹探测器测量.

DT 聚变产生的 14MeV 中子在逃离燃料区之前,有一定的概率与燃料离子即 D 或 T 离子发生弹性散射,  $Y_n$  个中子产生的反冲核数量  $Q$  为

$$Q = (n_D \sigma_D + n_T \sigma_T) R Y_n, \quad (5)$$

式中  $n_D$  和  $n_T$  分别为 D, T 离子数密度;  $\sigma_D$  和  $\sigma_T$  分别为 D, T 离子与 14MeV 中子发生弹性散射的截面 (0.62 和 0.92b);  $R$  为中子穿过燃料的平均距离;  $Y_n$  为中子产额. 对于等比 DT 情况 (5) 式成为

$$\rho R = 5.4 Q / Y_n, \quad (6)$$

或  $Q = 0.185 \rho R Y_n$ ,

式中  $\rho R$  的单位为  $g/cm^2$ . 如果 DT 聚变中子仅来源于燃料的中心, 那么  $R = R$ . 如果聚变反应在整个燃料中均匀地发生, 那么  $R = 0.75 R$ ,

则  $\rho R = 7.2 Q / Y_n$ ,

式中  $R$  为燃料聚变区的半径.

由于 CR39 具有有限的接收立体角  $\Omega$  和探测效率  $\epsilon$ , 所以反冲核径迹数  $Q_{det}$  与  $\rho R$  的关系为

$$\rho R = 5.4 \frac{Q_{det}}{Y_n} \frac{4\pi}{\Omega} \frac{1}{\epsilon}. \quad (7)$$

测量反冲 D 或 T 核在 CR39 中形成的坑型径迹, 根据 D 或 T 反冲核径迹数, 利用中子产额  $Y_n$ , 推算燃料的压缩面密度  $\rho R$ .

### 3 实验方法

#### 3.1 实验装置

在神光 II 装置上, 采用 8 束激光瞄准充有 DT 燃料的玻璃微型球, 在高温高压高密度的条件下发生聚变反应, 释放出 X 射线、中子、质子、 $\alpha$ 、反冲 D 核、反冲 T 核、反冲 Si 离子和反冲 O 离子等. 聚变反应出射粒子及实验原理示意图见图 2, 实验布局示意图见图 3, 实验装置在靶室的位置和探测室见图 4.

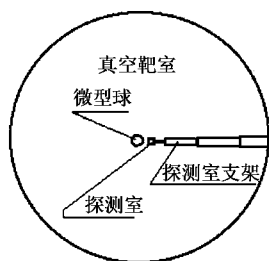


图3 实验布局示意图



(a)为神光 II 的靶室及实验装置位置



(b)为 CR39 探测室  
图4 实验装置实物照片

#### 3.2 实验安排

根据总体安排, CR39 探测室对 DT 微型球靶心的张角大小, 要求不能影响激光束入射和其他课题

的测量.因此,安排 CR39 探测器表面距靶心 3cm 作为测点.

为了避免能量为 3MeV 的 DD 质子在 CR39 中形成本底径迹,在 CR39 前放置厚度为  $40\mu\text{m}$  的 Ta 箔;放置 Ta 薄片的另一个目的是对 CR39 探测室进行真空密封,使 CR39 密封在处于空气环境的探测室中.

### 3.3 实验方法

实验中采用了两种等比 DT 薄壳靶,直径约  $200\mu\text{m}$  的爆推靶和直径约  $500\mu\text{m}$  的烧蚀靶,玻璃壳厚度约  $1\mu\text{m}$ ,两种靶的充气压力分别约为  $2.03 \times 10^6$  和

$5.07 \times 10^6$  Pa. 8 束波长为  $1.054\mu\text{m}$  的激光对称地照射靶丸,对应于两种靶型的激光能量分别约为 800J/80ps 和 4000J/800ps. CR39 位于距 DT 微型球靶心 3cm 处,测量反冲 D, T 核.

1. 照射 CR39 的厚度为  $500\mu\text{m}$ ,面积为  $1.2\text{cm}^2$ . 将 CR39 装配在探测室中,保证粒子束与 CR39 平面成  $90^\circ$  入射,使 CR39 探测器处于空气环境下照射.

2. 蚀刻 CR39(包括照射后的和未照射作为本底的 CR39)的蚀刻,采用浓度为 6.25N 的 NaOH 溶液,在  $80^\circ\text{C}$  恒温下蚀刻 5h. 典型的反冲 D 或 T 核在 CR39 中形成的坑型径迹见图 5.

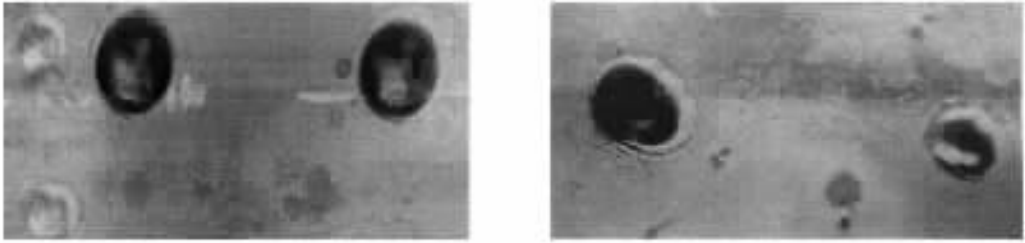


图 5 反冲 D 或 T 核径迹的典型照片

3. 测量 蚀刻后的 CR39 径迹探测器,在显微镜下扫描反冲 D, T 核径迹数.首先,对 CR39 中的本底径迹和次点进行分辨和鉴别;然后,对 D, T 反冲核在 CR39 中形成的径迹数进行测量.

## 4 燃料面密度测量结果

在显微镜下扫描反冲 D, T 核径迹数  $Q_{\text{det}}$ . 其立体角  $\Omega$  由下式计算

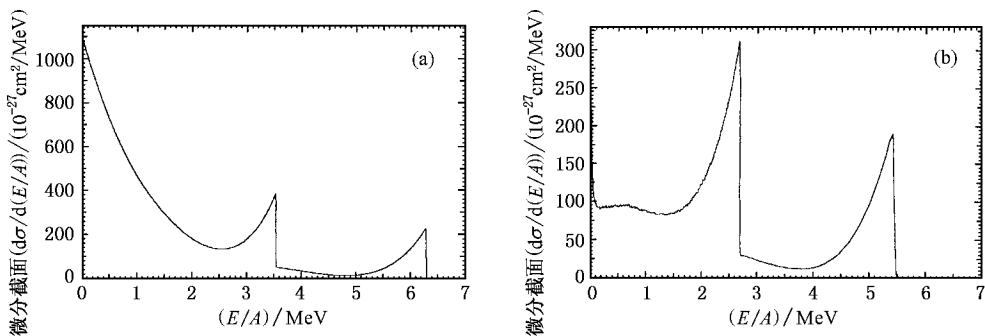
$$\frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + S/\pi L^2}} \right), \quad (8)$$

式中  $S$  为扫描面积,  $L$  为 CR39 与靶丸之间的距离.

反冲 D, T 核的能谱是连续分布的,最高能量分别为 12.5 和 10.6MeV,只有能量大于 4.49MeV 的 D 核和能量大于 5.09MeV 的 T 核能穿过  $40\mu\text{m}$  的 Ta 箔且在 CR39 中形成径迹,由此可得对反冲 D, T 核的探测效率分别为 0.426 和 0.227,从而总探测效率为 0.306.

图 6 给出了反冲 D, T 核的初始能谱和计算得到的穿过吸收片后的能谱.

应用反冲核径迹数  $Q_{\text{det}}$  与  $\rho R$  的关系式(7),获得的  $\rho R$  实测结果列于表 1.



(a) 为初始能谱

(b) 为穿过 Ta 箔后的能谱

图 6 反冲 D, T 核的初始能谱和计算所得穿过厚度为  $40\mu\text{m}$  的 Ta 箔后的能谱

表 1 反冲核法  $\rho R$  测量结果

发次	$Y_n/n \cdot \text{Shot}^{-1}$	$S/\text{mm}^2$	$\Omega/4\pi$	$Q_{\text{det}}$	Ta 箔厚度 $l/\mu\text{m}$	$\epsilon$	$\rho R / \text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$	备注
040703	$2.3 \times 10^9$	104.72	$9.01 \times 10^{-3}$	342	40	0.3056	$0.29 \pm 0.03$	
040705	$7.4 \times 10^8$	105.216	$9.05 \times 10^{-3}$	127	40	0.3056	$0.34 \pm 0.05$	
041106	$2.5 \times 10^9$	92.218	$7.96 \times 10^{-3}$	311	40	0.3056	$0.11 \pm 0.01$	两发 平均
041107	$3.9 \times 10^9$							
041108	$3.2 \times 10^9$	99.326	$8.56 \times 10^{-3}$	338	40	0.3056	$0.22 \pm 0.02$	
041210	$1.35 \times 10^9$	109.262	$9.39 \times 10^{-3}$	123	40	0.3056	$0.17 \pm 0.03$	
041211	$9.2 \times 10^8$	105.998	$9.12 \times 10^{-3}$	278	40	0.3056	$0.58 \pm 0.06$	小球
041714	$1.1 \times 10^8$	109.407	$9.40 \times 10^{-3}$	111	40	0.3056	$1.90 \pm 0.38$	
042119	$4.02 \times 10^7$	94.827	$8.18 \times 10^{-3}$	46	45.4	0.2824	$2.68 \pm 0.83$	
042121	$1.15 \times 10^8$	114.40	$9.82 \times 10^{-3}$	39	45.4	0.2824	$0.66 \pm 0.26$	

由表 1 可见,爆推靶  $\rho R$  低于烧蚀靶  $\rho R$  一个量级左右,表明烧蚀靶压缩情况比爆推靶好,这是由于烧蚀靶靶面激光照射更均匀且超热电子预热强度低.在爆推靶实验中,第 041211 发采用的靶球直径(约为  $100\mu\text{m}$ )比其他发次小,因而靶面激光照射均匀度相对较好, $\rho R$  测量结果明显高于其他发次,这同样表明了靶面激光照射均匀度对压缩状态具有一定程度的影响.在烧蚀靶实验中,第 042119 发由于激光能量低( $2210\text{J}/8\text{b}$ ),因而超热电子少,压缩情况较好, $\rho R$  大( $2.68\text{mg}/\text{cm}^2$ );第 041714 发激光能量提高到  $3084\text{J}/8\text{b}$ , $\rho R$  有所降低( $1.90\text{mg}/\text{cm}^2$ );第 042121 发激光能量高达  $3656\text{J}/8\text{b}$ ,超热电子预热效应严重, $\rho R$  仅为  $0.66\text{mg}/\text{cm}^2$ .

## 5 结 论

在神光 II 基频光直接驱动实验中,利用 CR39

径迹探测器通过测量反冲 D,T 核,首次实现了对燃料面密度  $\rho R$  的诊断.

测量结果表明,靶面激光照射均匀度对压缩状态具有一定程度的影响,烧蚀靶由于靶面激光照射均匀度比爆推靶好,有利于压缩, $\rho R$  具有高于爆推靶  $\rho R$  一个量级左右的总趋势;在烧蚀靶实验中,激光能量的变化对  $\rho R$  具有明显影响,提高激光能量所导致的超热电子预热效应不利于靶丸的压缩.

实验过程中得到了神光 II 激光器运行组人员及唐道源、张保汉、丁永坤等研究员的大力支持;在实验的准备期间,李伯阳、邹士亚、南亲良、刘浩才等给予了协助,在此表示真诚的感谢.

- |   |   |
|---|---|
| [ 1 ] J. Nuckolls, L. Wood, A. Theissen, Zimmerman, <i>Nature</i> , <b>293</b> (1972), 193.                     | [ 7 ] S. Kacenjar, S. Skupsky, A. Entenberg, <i>Phys. Rev. Lett.</i> , <b>49</b> (1982), 463.                             |
| [ 2 ] O. N. Krokhin, V. B. Rozanov, <i>Sov. J. Quantum Electron.</i> , <b>2</b> (1973) 393.                     | [ 8 ] J. L. Yang et al., <i>Acta Phys. Sin. (Overseas Edition)</i> , <b>8</b> (1999), 768.                                |
| [ 3 ] A. Peter Fews, Denis L. Henshaw, <i>Nuclear Tracks and Radiation Measurements</i> , <b>8</b> (1984), 519. | [ 9 ] Z. Y. Tang et al., <i>Acta Phys. Sin. (Overseas Edition)</i> , <b>8</b> (1999), 913.                                |
| [ 4 ] S. M. Lane, <i>Nuclear Tracks and Radiation Measurements</i> , <b>8</b> (1984), 289.                      | [ 10 ] S. Kacenjar, S. Skupsky, A. Entenberg, L. Goldman, M. Richardson, <i>Phys. Rev. Lett.</i> , <b>49</b> (1982), 463. |
| [ 5 ] Stanley Skupsky, Steve Kacenjar, <i>J. Appl. Phys.</i> <b>52</b> (1981), 2608.                            | [ 11 ] S. Skupsky, S. Kacenjar, <i>J. Appl. Phys.</i> , <b>52</b> (1981), 2608.   |
| [ 6 ] S. Kacenjar, L. M. Goldman, A. Eetenberg, S. Skupsky, <i>J. Appl. Phys.</i> , <b>56</b> (1984), 2027.     | [ 12 ] S. Kacenjar, L. M. Goldman, A. Entenberg, S. Skupsky, <i>J. Appl. Phys.</i> , <b>56</b> (1984), 2027.              |

## DT FUEL AREAL DENSITY DIAGNOSTIC IN DIRECT-DRIVEN IMPLOSIONS\*

YANG HONG-QIONG YANG JIAN-LUN WEN SHU-HUAI WANG GEN-XING GUO YU-ZHI

TANG ZHENG-YUAN MU WEI-BING MA CHI

( *Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, P. O. Box 919-212, Mianyang 621900, China* )

( Received 1 March 2001 ; revised manuscript received 2 June 2001 )

### ABSTRACT

The diagnostic of DT fuel plasma areal density in the direct-driven implosion experiments on SG-II laser facility has been performed by measuring the number of recoil D and T produced by 14MeV neutron's scattering. The particles of recoil D and T were detected by CR39 solid-state nuclear track detector. The experimental results indicate that the uniformity of laser illuminating affects the compression to a certain extent. The areal density of exploding pusher target is about one order lower than that of ablative-driven target. This means that the compression of ablative-driven target is better than exploding pusher target. There is a strong relationship between areal density and suprathermal electron heating.

**Keywords** : inertial confinement fusion , plasma diagnosis , fuel areal density , CR39

**PACC** : 5270 , 2940W

---

\* Project supported by the National High Technology Inertial Confinement Fusion Foundation of China ( Grant No. 863-416-3-4.8 ).