

# 软 X 光辐射烧蚀实验方法研究<sup>\*</sup>

丁耀南 杨家敏 郑志坚 易荣清 成金秀 何海恩  
黄天暄 孙可煦 李楠 王耀梅 崔延莉 胡昕  
陈久森 温天舒 于艳宁 温树槐 赵永宽

(中物院核物理与化学研究所, 成都525信箱77分箱, 610003)

**摘 要** 用强激光辐照金箔靶, 以金箔背侧软 X 光辐射为基础, 提出了软 X 光辐射烧蚀研究的新靶型、新方法, 做了 C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> 样品辐射烧蚀初步试验。

**关键词** 辐射烧蚀 金箔 C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> 实验方法

**ABSTRACT** Based on the rear X-ray emitted from gold foil irradiated by intense laser beam, The novel targets and experimental method for soft-X-ray-driven ablation were studied. The primary ablation experiments for C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> sample were also performed.

**KEY WORDS** X-ray-driven ablation, gold foil, C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> sample, experimental method

## 0 引 言

强激光束靶相互作用下, 强激光产生的 X 光辐射场对于物理学研究的意义和应用大致可以归纳为两个方面。一是在间接驱动惯性约束聚变研究中, 以高温辐射场驱动靶丸聚爆, 研究内爆动力学及其相关的影响内爆的混合, 界面不稳定性等物理现象; 二是利用强 X 光辐射场研究辐射烧蚀、辐射输运等辐射流体力学现象及其相关的高温物态特性、参数等物理问题。辐射烧蚀实验研究就是利用强激光产生的高温辐射场研究物理问题的一个重要方面, 对辐射流体力学和间接驱动的研究都具有重要意义。

为研究样品材料的辐射烧蚀特性, 必须从辐射烧蚀源、诊断技术等方面对实验方法进行研究。腔靶 X 光辐射和金箔背侧 X 光辐射是两种可选用的技术途径。在星光 II 装置上, 我们对金箔背侧 X 光辐射源进行了研究。在国外已有工作的基础上, 我们设计金箔基本型, 金箔 C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> 发泡材料结合型和隔离增强型三类辐射烧蚀靶, 进行了打靶实验。对不同靶型作了比较。在此基础上选择金箔基本型和隔离增强型结构, 又做了 C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> 样品材料辐射烧蚀初步试验, 取得了有意义的结果。

## 1 物理思想与靶设计

采用金箔背侧 X 光辐射以层靶方式研究辐射烧蚀的具体途径, 即是以强激光辐照高 Z 材料金箔, 由金箔背侧 X 光辐射烧蚀样品材料, 研究其辐射烧蚀特性。国外的一些工作<sup>[1-4]</sup>曾采用样品材料紧贴金箔和样品与金箔相分离的两种方式研究过低 Z 材料的辐射烧蚀特性。D. R. Kania<sup>[5]</sup>和 D. Babonneau<sup>[6]</sup>等人研究了金箔背侧 X 光辐射特性。在国外工作的基础上, 提出了

<sup>\*</sup> 国家863惯性约束聚变领域资助课题。  
1996年5月10日收到来稿, 1996年12月10日收到修改稿。  
丁耀南, 男, 1941年11月出生, 研究员, 博导。

金箔  $C_8H_8$  发泡材料结合型和隔离增强型新靶, 又设计了三类辐射烧蚀源靶和相应的辐射烧蚀靶。这三类辐射烧蚀源靶如图1(a), (b), (c)所示, 相应的辐射烧蚀靶如图2(a), (b), (c)所示。我们称三类靶型分别为(a)金箔基本型, (b)金箔发泡材料结合型和(c)隔离增强型。图2(d)所示靶型为半样品烧蚀靶, 采用空间分辨诊断技术, 可以由同一发打靶获取待研究样品前后的 X 光辐射信息。

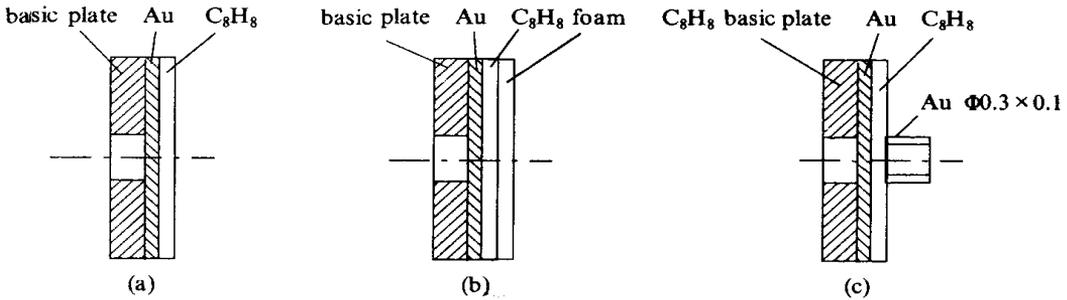


Fig 1 Source targets for soft- X- ray- driven ablation  
图1 辐射烧蚀源靶

金箔发泡材料结合型靶是利用其有利于 X 光辐射均匀化和形成超声速热波的特点, 尤其考虑到星光 II 激光打靶焦斑不均匀的情况。隔离增强型靶是在国外金箔- 样品简单分离的基础上, 在金箔和样品之间套以厚度为  $15\mu m$  的金材料圆筒,  $\Phi 300\mu m \times 100\mu m$ , 以期抑制 X 光真空逃逸, 增强 X 光辐射。金箔与样品的分离是为了抑制冲击波对样品的影响, 然而造成 X 光真空逃逸区。在间距为  $150\mu m$  和入射激光焦斑直径  $220\mu m$  的条件下, 隔离增强腔到达样品的 X 光减小因子约为  $0.35^{[7]}$ 。

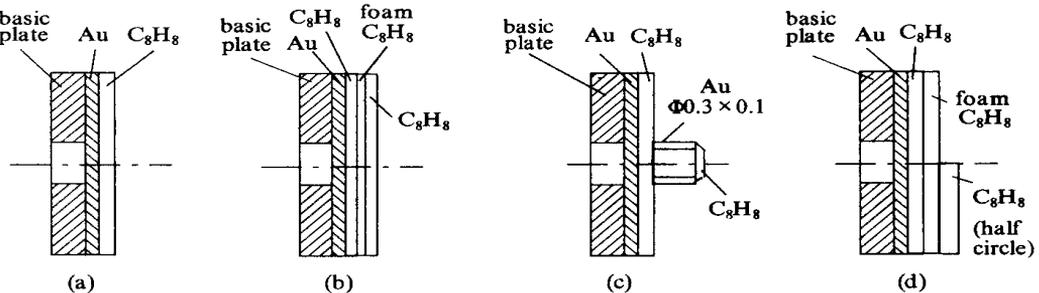
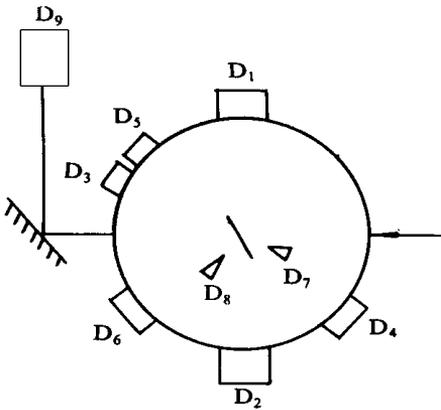


Fig 2 Targets for soft- X- ray- driven ablation  
图2 辐射烧蚀靶

为便于研究比较各类靶的效果, 各类靶金箔厚度一致, 约为  $0.13 \sim 0.17\mu m$ 。厚度为  $0.15\mu m$  的有机膜 ( $C_8H_8$ ) 用以支撑金箔。发泡材料密度  $67m g/cm^3$ , 厚度  $18\mu m$ 。烧蚀样品厚度有  $1, 3, 6\mu m$ 。

## 2 实验安排

实验是在星光 II 钨玻璃三倍频高功率激光装置上进行的。实验安排如图3所示。入射激光与靶平面法向成  $30^\circ$  角。  $D_1, D_2$  为两台滤片 X 射线二极管阵列亚千能谱仪, 分别探测靶前、后 X 光辐射。谱仪所用滤片为铝、铍、硼、碳、钛、铬、铜、锌、铝, 相应地所用吸收限能点分别为  $75, 110, 180, 280, 450, 540, 930, 1040, 1480eV$ 。新发展的低能道 ( $75, 110eV$ ) 对辐射烧蚀样品背侧



- D<sub>1</sub>, D<sub>2</sub>: sub-KeV X-ray spectrometer  
 D<sub>3</sub>: transmission grating spectrometer  
 D<sub>4</sub>, D<sub>5</sub>: pinhole transmission grating spectrometer  
 D<sub>6</sub>: time-resolved X-ray transmission grating spectrometer  
 D<sub>7</sub>, D<sub>8</sub>: pinhole camera  
 D<sub>9</sub>: optical calorimeter laser

Fig 3 Schematic of the experimental arrangement

图3 束-靶-探测器安排示意图

温度较低情况的辐射诊断是重要的。D<sub>1</sub>为七道谱仪,能道吸收边180至1480eV。D<sub>2</sub>为十道谱仪,实际用上面九个能道。D<sub>3</sub>为一套高分辨透射光栅谱仪,用于靶背能谱的细致测量,谱分辨为0.25nm,光栅线数为1606 1/mm。我们对光栅效率和记录胶片响应作了研究。D<sub>4</sub>、D<sub>5</sub>为两套参数相同的针孔透射光栅谱仪,分别监测靶前、后能谱,所用光栅线数8531/mm,谱分辨0.6nm,空间分辨60 $\mu$ m。D<sub>6</sub>为软 X 光透射光栅条纹相机,最好时间分辨30ps,谱分辨0.7nm。D<sub>7</sub>、D<sub>8</sub>为两台 X 光针孔照相机,分别监测靶前、后 X 光焦斑。针孔成象放大倍率为9.2,空间分辨为12 $\mu$ m。滤片为1 $\mu$ m 铝膜,截止能量 1keV。D<sub>9</sub>为光卡,用以监测靶后激光漏泄能量。

实验用激光束为80J, 800ps, 焦斑300 $\mu$ m。若焦斑内激光能量按定义为70%,则正入射情况靶面平均功率密度为9.9 $\times 10^{13}$ W/cm<sup>2</sup>, 30 $\circ$ 入射条件为8.6 $\times 10^{13}$ W/cm<sup>2</sup>。

### 3 主要实验结果

#### (1) 金箔背侧三类辐射烧蚀源的比较

对金箔基本型、金箔发泡材料结合型和隔离增强型辐射烧蚀源靶进行了研究。根据滤片 X 射线二极管阵列亚千能谱仪测得的三类辐射烧蚀源背侧各能道信号,以金箔基本型信号强度为1,对其它靶型的信号强度按各能道分别归一,得到三类靶型按能道分布的相对强度实验点如图4所示。由图可见,与金箔基本型相比,金箔发泡材料(18 $\mu$ m)结合型 X 光辐射明显减弱,亚千能区,碳的 K 限突变点附近的减小因子约为0.4,其它能道为0.1至0.2,甚至更小。与金箔基本型源靶相比,隔离增强型靶亚千能区的辐射增强因子为1.30-1.80,高能道(1480eV)有所减弱。

为进一步考察隔离增强型靶的辐射增强效应,我们对隔离增强型与金箔基本型辐射烧蚀靶背侧 X 光辐射强度也作了比较。材料样品厚度为6 $\mu$ m。实验表明,隔离增强靶样品背侧 X 光辐射与金箔基本型靶相比,具有类似于图4所示的辐射增强效应。

#### (2) 金箔靶 X 光辐射研究

我们以往进行过很多平面靶 X 光辐射研究,所用平面金靶都是厚靶,一般15~25 $\mu$ m。对于厚度为0.15 $\mu$ m 的金箔 X 光辐射进行研究尚属首次。

强激光与金箔相互作用产生 X 光辐射的行为与厚靶相比,最主要的特征是背向 X 光辐射。金箔背向 X 光辐射特性与入射激光参数和金箔厚度有关。人们在不同条件下对金箔背侧 X 光辐射进行过研究,具体数据并不很一致。我们对于厚度为0.13~0.17 $\mu$ m 的金箔靶前、后 X 光辐射进行了初步研究。用滤片 X 射线二极管阵列亚千能谱仪测得的金箔靶前、后 X 光辐射能谱如图5所示。入射激光束波长0.35 $\mu$ m,能量66.7J,脉宽716ps,靶面功率密度7.0 $\times 10^{13}$ W/cm<sup>2</sup>。

cm<sup>2</sup>。按照  $\phi$ 角均匀分布,  $\theta$ 角余弦分布, X 光焦斑直径300 $\mu$ m 计算, 得到金箔靶前、后 X 光份额 ( $E_x/E_L$ ) 分别为38% 和13%, 相应辐射温度为133eV 和101eV。

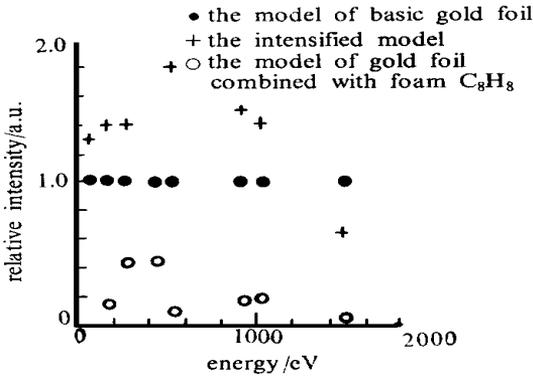


Fig 4 The comparison of relative intensity for three kind targets  
图4 三类辐射烧蚀源靶相对强度比较

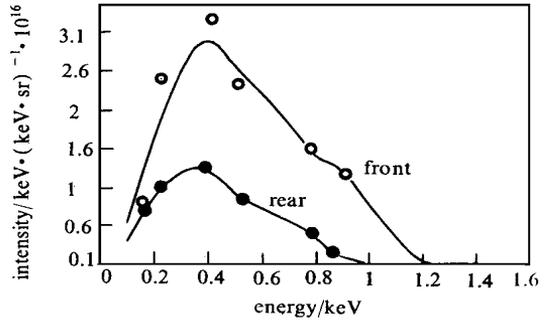


Fig 5 The X- ray spectra of gold foil target  
图5 金箔靶前、后 X 光辐射能谱

### (3) 辐射烧蚀实验结果

在对于辐射烧蚀源研究的基础上, 为了解利用金箔背侧 X 光辐射烧蚀样品的实验效果, 我们选择金箔基本型和隔离增强型辐射烧蚀靶摸索研究了 C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> 材料样品背侧 X 光辐射。在样品厚度为1 $\mu$ m 和6 $\mu$ m 的条件下, 滤片 X 射线二极管谱仪和透射光栅谱仪都能测到有意义的信号。由高分辨软 X 光透射光栅谱仪测得样品背侧 X 光谱的两发打靶实验结果如图6所示。所用靶型为隔离增强型辐射烧蚀靶, 其中95079发的样品厚度为1 $\mu$ m, 95080的样品厚度为6 $\mu$ m, 靶面激光能量分别为93 4J 和78 6J, 相对比较接近。同时给出的谱形已经对透射光栅、记录胶片的能量响应作了解谱处理, 给出了厚度为1 $\mu$ m 和6 $\mu$ m 的样品背侧的实际能谱分布, 暂按相对强度分布表示。

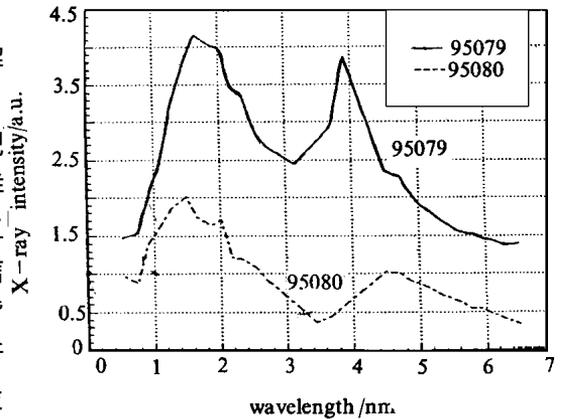


Fig 6 The spectra of X- ray emitted from sample rear  
图6 样品背侧 X 光辐射谱

## 4 结论与讨论

(1) 比较了金箔基本型, 金箔聚苯乙烯发泡材料结合型和隔离增强型三类金箔背侧辐射烧蚀源靶的基本特性。

在入射激光焦斑直径约300 $\mu$ m, 取  $\phi$ 00 $\mu$ m  $\times$  100 $\mu$ m 隔离增强金柱腔的条件下, 观察到隔离增强型源靶相对于金箔基本型源靶的辐射增强因子为1.30~ 1.80。实验观察到1480eV 能道的减弱是由于腔效应对辐射能谱的软化。

密度为67mg/cm<sup>3</sup>, 厚度为18 $\mu$ m 的 C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> 对于金箔背侧 X 光辐射能量吸收较大。要利用发泡材料利于 X 光辐射均匀化等优点会导致能量有效利用率降低。碳的 K 限吸收突变点附近衰减约为0.4, 其它能道区衰减为金箔基本型源靶的0.1~ 0.2, 甚至更低。要利用这类靶研究辐射烧蚀, 需要进一步降低发泡材料密度, 例如降为30mg/cm<sup>3</sup>。金箔发泡材料结合型靶在 K 限吸

收突变点附近 X 光辐射强度明显大于其它能道, 因而存在利用这类靶型研究以窄能带(或称准单色)辐射烧蚀的潜在可能性。

(2) 对于厚度为  $0.15\mu\text{m}$  的金箔, 以功率密度为  $7 \times 10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ , 波长为  $0.35\mu\text{m}$  的强激光辐照金箔靶, 实验测得靶前、后辐射温度分别为  $133\text{eV}$  和  $101\text{eV}$ 。

(3) 利用金箔基本型和隔离增强型靶, 在星光 II 条件下 ( $0.35\mu\text{m}$ ,  $80\text{J}$ ,  $800\text{ps}$ ) 下, 在厚度为  $6\mu\text{m}$  的  $\text{C}_8\text{H}_8$  样品背侧滤片 X 射线二极管阵列亚干能谱仪和透射光栅都能测得有意义的辐射信号。辐射烧蚀实验研究新方法得到了初步检验。通过对金箔背侧新型 X 光辐射源和新发展的诊断方案等方面的研究建立了一种辐射烧蚀研究的新方法。

致谢 感谢应用物理与计算数学研究所曾先才等人的理论指导和支持。感谢核物理与化学研究所在星光装置上为实验付出辛勤劳动的科技人员和工人。靶工艺研究室精心研制了各类实验用靶。

## 参考文献

- 1 Schwanda W, et al *Phys Rev. Lett.*, 1992, **69**: 3507
- 2 Celliers P, et al *Phys Rev.* 1990, **A41**: 3270
- 3 Edwards J, et al ARL- 91- 025, p. 13
- 4 Edwards J, et al ARL- 90- 026, p. 26
- 5 Kania D R, et al *Phys Rev.* 1992, **A 46**: 7853
- 6 Babonneau D, et al *Laser and Particle Beams* 1991, **9**: 527
- 7 Mochizuki T, et al *Phys Rev.* 1987, **A 36**: 3279

## STUDY OF EXPERIMENTAL METHOD FOR SOFT- X- RAY - DRIVEN ABLATION

Ding Yaonan, Yang Jianin, Zheng Zhijian, Yi Rongqing, Cheng Jinxiu,  
He Haien, Huang Tianxuan, Sun Kexu, Li Nan, Wang Yaomei, Cui Yanli,  
Hu Xin, Chen Jiuse, Wen Tianshu, Yu Yanning, Wen Shuhuai, and Zhao Yongkuan  
*Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, P. O. Box 525-77, Chengdu 610003*

Soft- X- ray- driven ablation is an important process for indirect drive implosion in inertial confinement fusion. It is necessary to study experimental method in order to obtain the feature of some material ablated by soft- X- rays in experiment.

Three kinds of target, the model of basic gold foil, intensified model and the model of gold foil combined with foam  $\text{C}_8\text{H}_8$ , were designed and studied. The feature of  $\text{C}_8\text{H}_8$  sample ablated by soft- X- rays were also studied primarily. The experiments were performed in Sing Guang Nd- glass laser facility the first time in China. The laser energy was about  $80\text{J}$ , pulse duration  $0.8\text{ns}$  and wavelength  $0.35\mu\text{m}$ . Experimental results show that X- ray intensity was increased obviously for the intensified model target and the X- ray is quasi-monochromatic but reduction in intensity for the model of gold foil combined with foam CH. The spectra of X- rays emitted from gold foil and sample rear were also obtained.

The novel targets and experimental method, the main results and so on are presented briefly.