

# 软 X 射线辐射加热金盘靶的 X 射线再发射

黄天 孙可煦 郑志坚 易荣清

丁永坤 丁耀南 崔延莉 唐道源

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

(1997 年 4 月 1 日收到; 1997 年 6 月 29 日收到修改稿)

用两台时间关联的软 X 射线能谱仪观测软 X 射线辐射( $(2-6) \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ )加热金盘靶的 X 射线再发射. 从再发射 X 射线的时间能谱可看出能谱被“软”化. 根据加热脉冲时间修正烧蚀热波的稳态自相似解, 分析 X 射线再发射的时间演变过程.

PACC: 5270; 5110; 5250J; 5240

## 1 引 言

间接驱动惯性约束聚变(inertial confinement fusion, 缩写为 ICF)实验通常采用金空腔靶<sup>[1]</sup>. 靶内分转换区和内爆区两大部分. 把  $0.35 \mu\text{m}$  激光注入腔内, 在转换区与等离子体相互作用转换为软 X 射线能量. 通过辐射输运把 X 射线能量转移到内爆区, 驱动燃料靶丸, 实现内爆.

激光等离子体相互作用具有强烈的非平衡特性, 产生的软 X 射线辐射以谱线为主. 在空腔靶内, 软 X 射线辐射加热靶壁时, 只有少部分能量被靶壁吸收, 大部分再发射 X 射线重新进入腔内形成辐射场. X 射线辐射与靶壁物质及空间等离子体反复作用、交换能量, 辐射场与物质都渐近平衡. 这就是腔内 X 射线辐射输运<sup>[1,2]</sup>.

腔内 X 射线辐射输运过程是间接驱动惯性约束聚变实验研究的关键, 但是腔内辐射输运过程复杂, 很难诊断分析. 分解实验中用开放的双盘靶结构代替基本闭合的金空腔靶<sup>[3,4]</sup>. 以  $0.35 \mu\text{m}$  激光入射到初级金盘上, 用激光等离子体产生的软 X 射线辐射加热次级金盘, 再发射 X 射线. 这一过程与腔内辐射场加热腔壁的 X 射线再发射过程相近, 有利于抓住主要物理机制, 降低诊断难度.

目前在软 X 射线辐射加热各种材料的 X 射线再发射研究方面, 美国 Lawrence Livermore 实验室在理论数值模拟和实验上都走在前列, 其结果已应用在内爆靶能量耦合效率的计算中<sup>[1]</sup>.

## 2 时间同步测量方法

双盘靶实验布局如图 1 所示. 利用两台时间关联的软 X 射线能谱仪分别监测初级盘 X 射线发射谱和次级盘的 X 射线再发射谱. 这种谱仪主要由各种元素的滤片和 X 射线二

极管阵列构成,采用多台示波器记录快时间信号.显然,各能道之间无法保持时间同步.我们利用一个同种二极管产生的脉冲(初级盘,加碳滤片)匹配分路作为同步时标.每一能道信号配一路时标,进行同步时间关联.采用双通道示波器以相加方式记录脉冲时间波形,通过通道传输时间差把信号与同步时标脉冲分开.对同一示波器而言,由于光程、电缆长度和通道延迟都不一样,两通道存在固有传输时间差  $\Delta t_d = t_{d2} - t_{d1}$ .其中,  $t_{d1}$  为时标通道传输时间,  $t_{d2}$  为信号通道传输时间.

我们利用图 2 所示镀金球靶实验测量  $\Delta t_d$ .保持整个探测系统不变,谱仪所有探头都换用碳滤片分光来获得同步脉冲.然后分别在每台示波器上比较两个脉冲的时间间隔就能得到  $\Delta t_d$ .在双盘靶实验中,以同步时标为统一时间基准,用  $\Delta t_d$  加以修正,就可以恢复各能道信号之间的时间同步特性.为提高定时精度,采用恒比定时方法.该方法在核物理实验中广泛应用,可以确定小于探测系统分辨时间的时间间隔<sup>[5,6]</sup>.

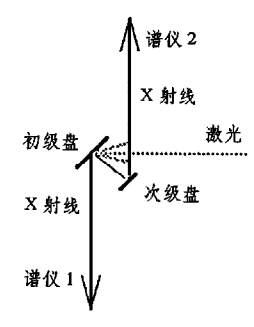


图 1 双盘靶实验布局示意图

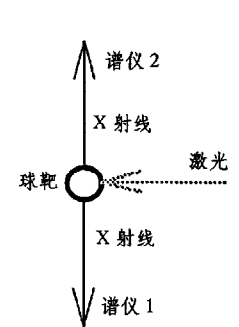


图 2 球靶实验布局示意图

3 实验安排

- 1. 实验在星光 II 装置上进行.激光波长为  $0.35\text{ }\mu\text{m}$ , 能量为  $40\text{--}60\text{ J}$ , 脉冲时间宽度为  $600\text{--}800\text{ ps}$ , 焦斑直径为  $150\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$ , 靶室真空度为  $1\times 10^{-3}\text{ Pa}$ .
- 2. 镀金玻璃球靶,玻璃球直径为  $300\text{ }\mu\text{m}$ ,金镀层厚度为  $0.4\text{--}0.5\text{ }\mu\text{m}$ .双盘靶盘厚度为  $5\text{ }\mu\text{m}$ ,初级盘直径为  $600\text{ }\mu\text{m}$ ,次级盘直径为  $(300\pm 10)\text{ }\mu\text{m}$ .两盘间距  $L=500, 700\text{ }\mu\text{m}$  两种.
- 3. 两台软 X 射线能谱仪的配置参量分列于表 1 和表 2. 为抑制低能道滤片高能尾部

表 1 第一台谱仪各道配置参量

| 探测道                                  | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6    | 时标  |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| 滤片材料                                 | 硼   | 碳   | 钪   | 铁   | 镍   | 铝    | 碳   |
| 厚度/ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ | 506 | 457 | 686 | 552 | 739 | 1644 | 235 |
| 平面镜                                  | 有   | 有   | 有   | 无   | 无   | 无    | 无   |
| 能道中心/eV                              | 170 | 260 | 470 | 510 | 670 | 1300 | —   |

的影响,在谱仪的前三个能道分别采用 X 射线掠入射式平面反射镜(简称平面镜),材料为镍,掠入射角为  $5^\circ$ .

4. 记录设备及其它. 频带宽为 **1000 MHz** 的示波器若干, 记录信号时间波形. 硅光二极管一个, 提供触发信号. 型号为 **ST400** 的同步机一台, 提供同步触发信号. 阻抗匹配分路盒一个, 提供分路时标信号.

表 2 第二台谱仪各道配置参量

| 探测道                                  | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10   |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 滤片材料                                 | 铝   | 硼   | 碳   | 钒   | 铬   | 铁   | 镍   | 铜   | 锌   | 铝    |
| 厚度/ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ | 235 | 455 | 326 | 500 | 517 | 446 | 534 | 590 | 600 | 1026 |
| 平面镜                                  | 有   | 有   | 有   | 无   | 无   | 无   | 无   | 无   | 无   | 无    |
| 能道中心/eV                              | 60  | 170 | 260 | 460 | 510 | 610 | 750 | 850 | 940 | 1200 |

4 实验结果分析

4.1 软 X 射线辐射加热模型

如图 3 所示, 采用烧蚀热波(ablative heat wave, 缩写为 **AHW**)近似描述软 X 射线辐射加热金盘靶的物理过程<sup>[3]</sup>.

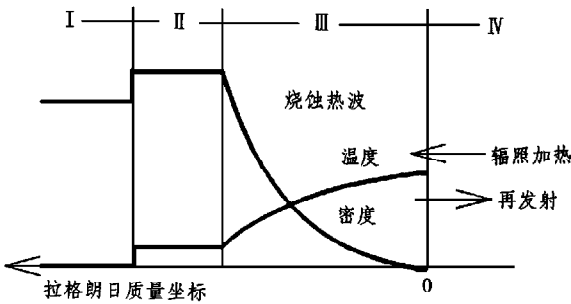


图 3 辐射加热金盘靶的物理模型 I 为静态区; II 为冲击波压缩区; III 为热波烧蚀区; IV 为真空区

下面以  $S_s(t)$  表示加热 X 射线功率密度,  $S_r(t)$  表示再发射 X 射线功率密度,  $T(t)$  表示热波温度,  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 常量,  $S(t)$  表示净入射功率密度,  $E_{\text{tot}}(t)$  表示等离子体总能量. 假定热波烧蚀区对于软 X 射线光性厚, 上述物理量满足以下关系:

$$S_r(t) = \sigma T^4(t), \tag{1}$$

$$S(t) = S_s(t) - S_r(t), \tag{2}$$

$$E_{\text{tot}}(t) = \int_0^t S(\zeta) d\zeta. \tag{3}$$

如果净入射功率密度  $S$  为常量, 持续时间为  $\tau$ , 根据稳态热波近似理论分析, 可得到等离子体质量烧蚀率为

$$\dot{m} = 2.0 \times 10^{-7} S^{7/13} \times \tau^{-3/13}. \tag{4}$$

另外,不计等离子体流体力学动能影响,根据状态方程得到等离子体比热容为

$$c(T) = 3.05 \times 10^4 T^{1/2}. \quad (5)$$

最后利用以上关系式,给出等离子体质量守恒和能量守恒方程的差分格式

$$m(t + \Delta t) = m(t) + \dot{m}(t) \Delta t, \quad (6)$$

$$T(t + \Delta t) = T(t) + \frac{S(t) m(t) - \dot{m}(t) E_{\text{tot}}(t)}{m^2(t) c(T)} \Delta t. \quad (7)$$

虽然不能直接把(4)式代入(6)和(7)式计算,但可以根据等离子体总能量和净入射功率密度把加热脉冲等效为持续时间  $\tau$  的方波  $S^{[4]}$ .再假定在初始时刻  $t_0$ ,  $S_r(t_0)$  远小于  $S_s(t_0)$ ,就可以通过以上方程组计算  $S_r(t)$ .

## 4.2 滞后等离子体发射 X 射线

图 4 所示为双盘靶实验中,  $L = 700 \mu\text{m}$  时,第二台谱仪第 7 能道测得的次级 X 射线脉冲.脉冲波形中出现双峰结构.由于 X 射线与飞散等离子体存在飞行时间差,而且后峰出现时间与盘间距  $L$  有关,可以判断前峰为 X 射线再发射,后峰为滞后等离子体碰撞发射 X 射线.滞后等离子体发射 X 射线的相对强度还与初级焦斑等实验条件有关.

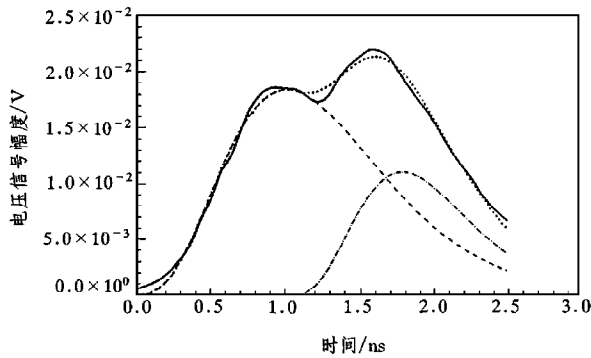


图 4 X 射线脉冲波形剥谱 ——为 X 射线脉冲波形; .....为拟合曲线; ----为 X 射线再发射; - · - 为等离子体滞后发射

以两个半高斯函数叠加的方式对 X 射线双峰脉冲进行剥谱,半高斯函数的形式为

$$g(t) = a(t - t_0)^4 e^{-(t - t_0)/\tau} u(t - t_0). \quad (8)$$

剥谱结果表明,  $L = 700 \mu\text{m}$  时,双峰时间间隔约为  $0.9 \text{ ns}$ ,金 N 带能区较强.  $L = 500 \mu\text{m}$  时,双峰时间间隔缩短,约为  $0.5 \text{ ns}$ .

## 4.3 X 射线发射时间能谱

根据每一时刻各能道信号数值和谱仪参数,通过专用 X 射线时间解谱程序 2.0 版,可逐步计算 X 射线发射的时间能谱.图 5 和图 6 给出  $L = 700 \mu\text{m}$  时,初、次级盘 X 射线发射时间能谱.由于次级金盘光性厚,入射软 X 射线与次级金物质充分相互作用,交换能量<sup>[7,8]</sup>.再发射 X 射线高能道的相对强度下降,谱成分明显“软化”,更接近黑体辐射.

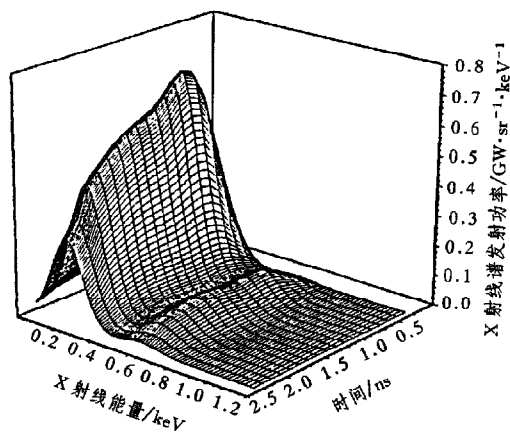


图5 初级X射线发射时间能谱

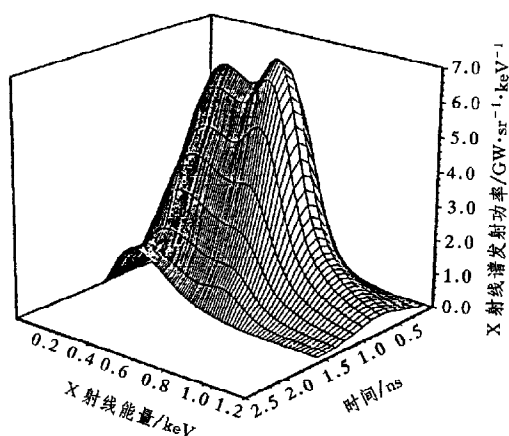


图6 次级X射线发射时间能谱

#### 4.4 软X射线辐射加热和再发射的功率密度

图7和图8分别给出  $L=500\ \mu\text{m}$  和  $L=700\ \mu\text{m}$  时次级盘辐射加热与再发射功率密度,并与等效热波近似模型的计算结果进行了比较.可以看出,脉冲前沿符合较好,后沿偏离较大.可以解释如下:一方面,由于在后沿等离子体开始冷却,以及等离子体流体动能影响增大,烧蚀模型不再适用;另一方面,次级发射X射线不仅包括次级盘再发射X射线,还有滞后等离子体碰撞发射X射线的影响.表3列出相关实验数据.

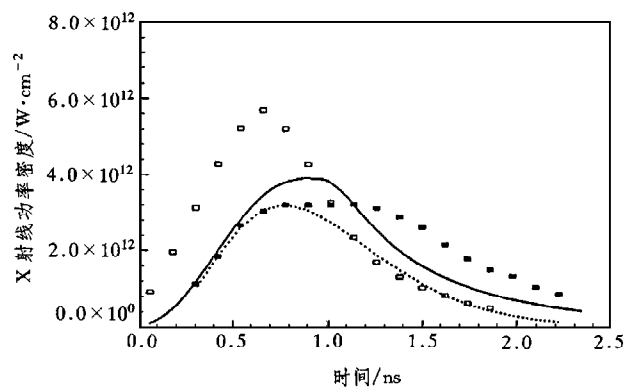


图7  $L=500\ \mu\text{m}$  时,次级盘加热与再发射功率密度 □为加热X射线;■为次级盘发射X射线;—为再发射的理论值;·····为剥谱得到的再发射值

上述实验数据的强度误差包括探测器的测量误差和解谱误差.前者主要源于探测器灵敏度和滤片厚度的标定误差  $\pm 20\%$ ;后者由于必须用到函数拟合来插值回推能谱,误差小于  $\pm 15\%$ .所以强度总误差为  $\pm 25\%$ .X射线脉冲前沿上升时间约为  $1\ \text{ns}$ ,探测系统分

辨时间小于 0.4 ns. 采用 10% 恒比定时, 由同步时标脉冲前沿的噪声涨落和上升时间差异引起的同步时间误差为  $\pm 0.08$  ns.

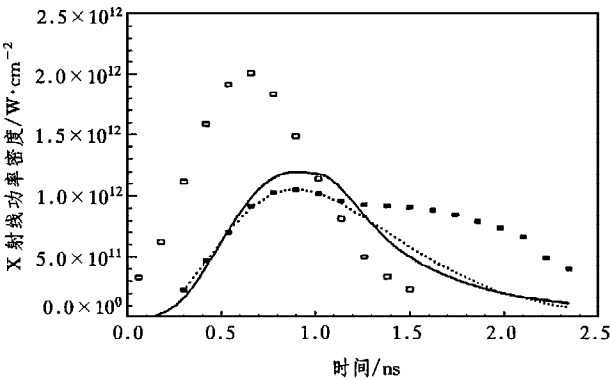


图 8  $L=700\text{ }\mu\text{m}$  时, 次级盘加热与再发射功率密度  $\square$  为加热 X 射线;  $\blacksquare$  为次级盘发射 X 射线; — 为再发射的理论值;  $\cdots$  为剥谱得到的再发射值

表 3 双盘靶实验数据

| $L/\mu\text{m}$ | 激光<br>能量/J | 激光脉冲<br>宽度/ns | $S_s(t)$ 峰值<br>$/10^{12}\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ | $S_r(t)$ 峰值<br>$/10^{12}\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ | $T(t)$ 峰值<br>/eV | 峰值再<br>发射率/% |
|-----------------|------------|---------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------|--------------|
| 500             | 61.2       | 0.686         | 5.7                                                  | 3.22                                                 | 75               | 56.5         |
| 700             | 38.4       | 0.616         | 2.0                                                  | 1.05                                                 | 57               | 52.5         |

5 结 论

利用同步时标作相对时间基准, 恢复了软 X 射线能谱仪各能道之间的时间同步特性 ( $\pm 0.08$  ns). 解出双盘靶初、次级 X 射线发射时间能谱, 证实了软 X 射线与光性厚金物质相互作用后, 能谱软化, 更接近黑体辐射. 强度误差为  $\pm 25\%$ , 探测系统分辨时间小于 0.4 ns.

根据热波近似和光性厚假设计算得到的  $S_r(t)$  与实验结果基本符合. 实验给出了辐射功率密度为  $(2\text{—}6)\times 10^{12}\text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$  时, 峰值再发射率为 52.5%—56.5%. 由于滞后等离子体碰撞发射 X 射线与次级盘再发射 X 射线脉冲重叠, 对实验诊断和分析产生不利影响, 应在以后实验中设法解决.

对温树槐、江文勉等老师在理论和实验方面给予的细心指导表示感谢.

[1] J. Lindl, Development of the Indirect-Drive Approach to Inertial Confinement Fusion and the Target Physics Basis for Ignition and Gain(Lawrence Livermore National Laboratory, USA, 1995), p. 56.  
[2] 常铁强等, 激光等离子体相互作用与核聚变(湖南科学技术出版社, 长沙, 1991), 第 234 页.

- [3] R. Pakula, R. Sigel, *Phys. Fluids*, **28**(1985), 232.
- [4] M. Murakami *et al.*, *Nuclear Fusion*, **31**(1991), 1315.
- [5] 王经瑾等, 核电子学(下册)(原子能出版社, 北京, 1985), 第 19 页.
- [6] 复旦大学、清华大学等校合编, 原子核物理实验方法(上册)(原子能出版社, 北京, 1985), 第 245 页.
- [7] R. L. Kauffman *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**(1995), 678.
- [8] R. Sigel, R. Pakula, S. Sakabe, G. D. Tsakiris, *Phys. Rev.*, **A38**(1988), 5779.

## X-RAY REEMISSION FROM GOLD DISK TARGETS HEATED BY SOFT X-RAY RADIATION

HUANG TIAN-XUAN SUN KE-XU ZHENG ZHI-JIAN YI RONG-QING  
DING YONG-KUN DING YAO-NAN CUI YAN-LI TANG DAO-YUAN

(Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

(Received 1 April 1997; revised manuscript received 29 June 1997)

### ABSTRACT

X-ray reemission from gold disk targets, which were heated by intense soft X-ray radiation ( $(2-6) \times 10^{12} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$ ), had been observed with two time-related soft X-ray spectrometers. The spectra of X-ray reemission were “softer” than those of irradiating X-ray. Temporal evolution of the X-ray reemission was analyzed in terms of a time-modified self-similar solution for the ablative heat wave.

PACC: 5270; 5110; 5250J; 5240