

文章编号： 1001-4322(2002)06-0865-04

# 辐射烧蚀 CH 薄膜非平衡理论计算 与实验比对分析\*

盛家田<sup>1</sup>, 杨家敏<sup>2</sup>, 李永生<sup>1</sup>, 丁耀南<sup>2</sup>, 冯庭桂<sup>1</sup>, 江少恩<sup>2</sup>, 张利发<sup>1</sup>, 李 蒙<sup>1</sup>

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 用一维非平衡辐射输运程序和实验提供的黑腔辐射流,对 CH 薄膜靶的辐射烧蚀进行了数值模拟计算。计算结果表明,非平衡的黑腔辐射场对 CH 薄膜靶辐射烧蚀的影响十分明显。出靶外界面的辐射流总强度、等效辐射温度随时间变化、400eV 光子出界面延迟时间随靶厚度变化规律等方面的数值模拟结果与实验结果基本符合。

**关键词:** 辐射输运; 辐射烧蚀; 辐射流

**中图分类号:** TN246 **文献标识码:** A

在研究 ICF 间接驱动内爆压缩过程中,辐射场对靶丸烧蚀过程起十分重要的作用。为了获得靶丸高压压缩比,必须研究辐射烧蚀过程的规律。曾先才等人曾经用解析方法和数字模拟方法对平衡辐射烧蚀过程进行了研究<sup>[1,2]</sup>。Sigel<sup>[3,4]</sup>,Porter<sup>[5]</sup>,Orzechowski<sup>[6]</sup>等人对高 Z 元素的辐射烧蚀进行过理论和实验研究,九十年代 Dwards<sup>[7]</sup>,Endo<sup>[8]</sup>,Kaiser<sup>[9]</sup>,Piriz<sup>[10]</sup>等人对低 Z 元素辐射烧蚀的再发射和辐射传播进行了研究。Edwards<sup>[11]</sup>等人用普朗克谱和金元素发射能谱(有 M,N,O 带)照射低 Z 元素薄膜,实验发现两者辐射烧蚀没有明显的差别。研究 CH 材料的辐射烧蚀是 ICF 间接驱动中一个十分重要的课题。我们在神光 II 装置上通过平板 CH 辐射烧蚀实验结果与理论计算比对,进一步加深对辐射烧蚀规律的认识,从而更好地修正理论,检验参数和校对程序。在内爆靶丸设计中,最大可能地减少理论设计的不确定因素,使得内爆压缩过程模拟更精确更可靠。我们用一维非平衡辐射输运程序<sup>[12]</sup>,利用实验提供的黑腔辐射流作为源,对光子能量按平衡和非平衡两种分布进行了模拟计算,通过理论计算和实验结果比对获得了一些定性和半定量结果。这些结果为今后 CH 材料辐射烧蚀实验提出了更明确的目标和内容,并为今后理论设计内爆靶丸提供了更可靠的基础。

## 1 实验安排和靶结构

图 1 给出八路激光束分别从腔靶两端(每端四路)注入黑腔内。两台单特谱仪(SXS)分别监测出靶外界面能谱和黑腔内放样品附近不同频率辐射流强度。一台透射光栅谱仪监测时间空间积分辐射能谱。每束激光平均能量 260J。

为了研究辐射对不同薄膜靶厚度的烧蚀规律,我们选择了五种厚度(3.18, 4.17, 7.83, 15, 45 $\mu\text{m}$ )CH 平板薄膜作为辐射烧蚀样品。CH 物质密度为 1.1g/cm<sup>3</sup>。

## 2 理论模拟与实验结果比对分析

### 2.1 出靶界面等效辐射温度

理论上用实验给出的辐射温度曲线和辐射流谱形作为辐射源进行数值模拟。图 2,图 3,图 4 分别表示用在靶面上的辐射温度随时间的变化曲线,光子非平衡能谱分布和光子的普朗克谱。实验通过测量某一个角度出靶界面辐射流强度,再按半空间求和平均得到出靶界面等效辐射温度随时间的变化曲线。

$$T_r = \sqrt[4]{4 E_p / ac}$$

式中:  $E_p$  是单位时间、单位面积上的光子辐射能量;  $a = 0.7565 \times 10^{-2}$  (Stefan-Boltzmann 常数);  $c$  是光速。

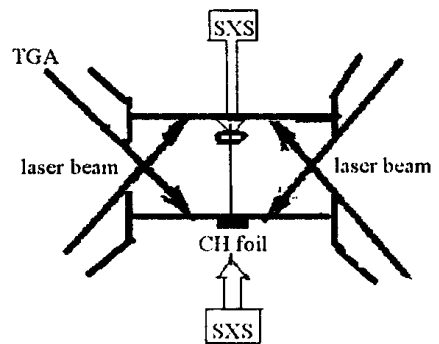


Fig. 1 Experiment diagnoses sketch

图 1 实验诊断示意图

\* 收稿日期:2002-04-08; 修订日期:2002-07-01  
基金项目:国家 863 惯性约束聚变领域资助课题  
作者简介:盛家田(1939-),男,研究员,北京 8009 信箱。

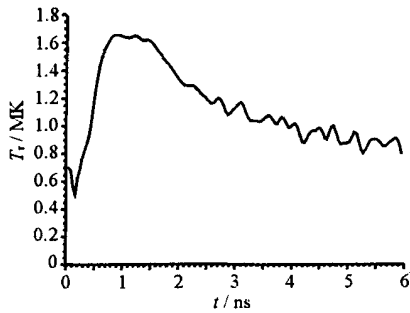


Fig. 2 Radiation source temperature as a function of time

图2 辐射源温度随时间变化曲线

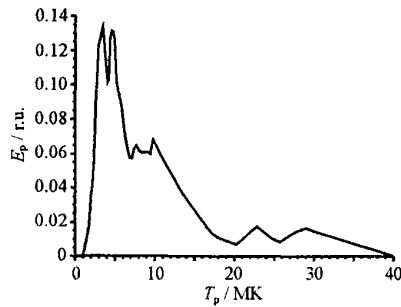


Fig. 3 Energy spectrum of radiation flux

图3 时间积分辐射流能谱

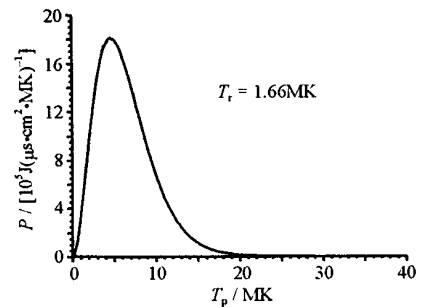


Fig. 4 Planck spectrum at radiation temperature of 1.66 MK

图4 辐射温度 1.66 MK 的普朗克谱

图5(a)~(d)分别给出了CH靶厚度为3.18, 7.83, 15和45 $\mu\text{m}$ 的实验和理论计算出靶界面等效辐射温度随时间变化的曲线。由图可知,理论计算出靶界面等效辐射温度峰值以及随时间变化规律与实验基本符合。对于薄靶(例如图5(a), 4(b)所示),辐射温度上升前沿比实验值低,过峰值后,理论与实验结果基本一致。随着靶厚度增加上升前沿和过峰值后理论偏离实验结果。这种差别主要是我们用的辐射温度源做了空间平均处理,非平衡谱没有时间分布,因此,理论上用的源是作用在靶面上真实辐射源的一种近似。

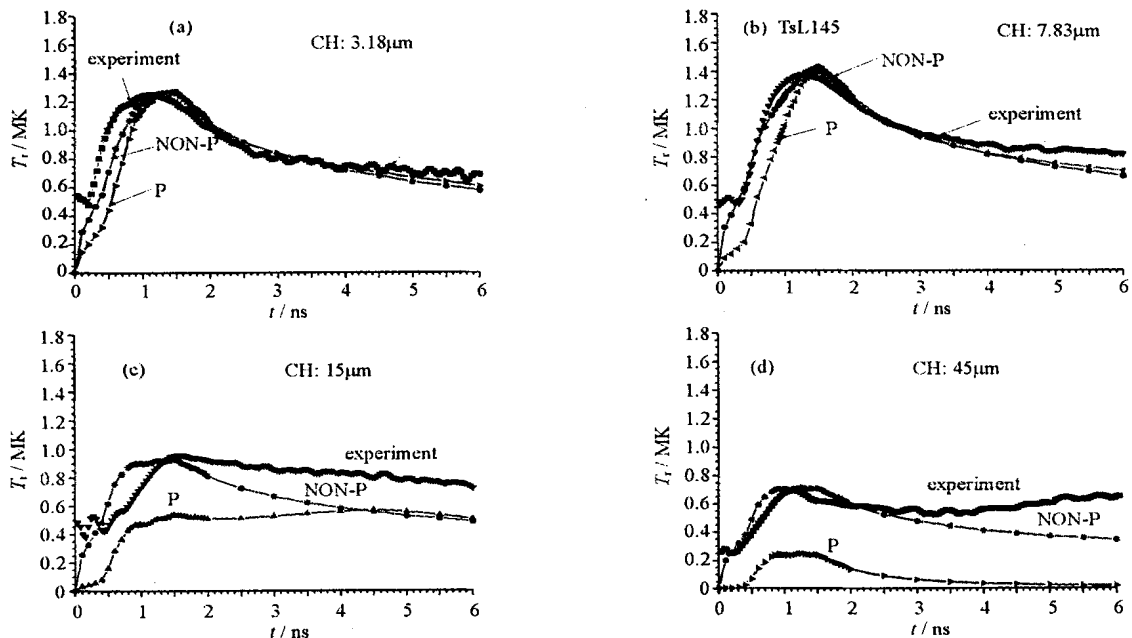


Fig. 5 Radiation temperature at the rear of CH foil vs the thickness of CH foil

图5 外界面等效辐射温度随靶厚度变化曲线

## 2.2 辐射源能谱分布对辐射运输的影响

在理论模拟中,除了用实验测量的辐射源能谱分布进行数值模拟外,还研究了辐射源能谱是平衡分布的情况(如图4所示)。在图5(a)~(d)中,非平衡谱用NON-P表示,平衡谱用P表示。对于薄靶(如图5(a), 5(b)),非平衡谱计算结果曲线的上升前沿更靠近实验值。过峰值后,平衡谱和非平衡谱都与实验值较好符合。对于厚靶(如图5(c), 5(d)),平衡谱计算结果偏离实验值较远,非平衡谱计算结果比较接近实验结果。对于薄靶,无论是低能光子较多的平衡谱还是高能光子较多的非平衡谱,都是光性薄物质,因此它们都能直穿界面。由于高能光子出界面早,所以,上升前沿比平衡谱快。对于厚靶,因为非平衡谱高能光子比较多,对于它们是光性薄,穿出界面高能光子较多,辐射温度较高。而平衡谱高能光子少,大部分低能光子是光性厚出不来。因此,出界面辐射温度低,与实验结果偏离较远。

## 2.3 出界面等效辐射温度峰值随靶厚度变化

图6给出了实验和理论计算辐射出界面等效辐射温度峰值随靶厚度的变化关系。对于薄靶,无论是平衡

谱或是非平衡谱计算结果与实验都符合较好。对于厚靶,理论与实验有一定偏差,只是非平衡谱计算比较接近实验结果,尤其靶厚是  $45\mu\text{m}$  时平衡谱计算与实验结果相差较大。这是因为,对于厚靶,能够出界面的只有那些高能光子,平衡谱绝大部分光子被物质吸收。这表明辐射源的频谱分布对辐射烧蚀的影响十分明显,不能忽略。

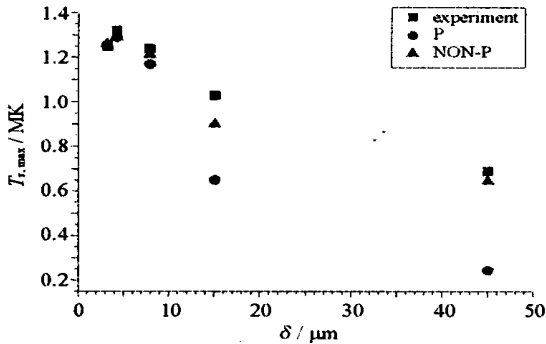


Fig. 6 Peak value of outer radiation temperature as a function of CH foil thickness

图6 出界面辐射温度峰值随靶厚度变化曲线

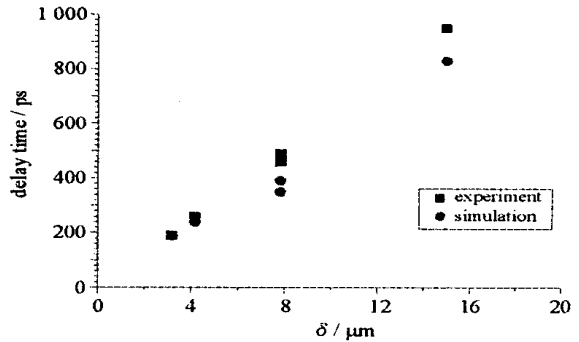


Fig. 7 Time delay of 400eV photon as a function of CH foil thickness

图7 能量400eV光子出界面延迟时间与靶厚度关系

#### 2.4 400eV 光子出界面延迟时间随靶厚度的变化

图7给出能量为400eV光子的出界面延迟时间与靶厚度变化的关系。该光子出界面辐射流强度全高半宽对应时间定义为延迟时间。实验上没有做时间绝对标定,理论计算只取了相对时间为零点。由图可知,400eV光子出界面延迟时间随靶厚度增加而增加。延迟时间随靶厚度成线性变化趋势与实验结果基本符合。

### 3 结论

黑腔内的非平衡谱对辐射烧蚀的影响非常明显,不可忽略。

理论计算出界面辐射流时间积分总量,出界面等效辐射温度随时间变化规律,400eV光子出界面延迟时间随靶厚度成线性变化规律等与实验结果基本符合。

通过理论与实验比对,在出界面等效辐射温度的时间行为,光子出界面延迟时间大小,出界面辐射流谱分布等方面与实验还有一定程度偏离。建议进一步做实验,通过对出界面辐射流的角分布测量,对辐射源谱分布的时间测量等,改进理论和实验的比对,更精确地标定和校验程序。

#### 参考文献:

- [1] 曾先才,姜荣洪,常铁强.热辐射驱动烧蚀平面金靶的数值标定定律[J].强激光与粒子束,1991,3(4):477. (Zeng X C, Jiang R H, Chang T Q. Numerical scaling laws of thermal radiation-driven ablation in Au planar targets. *High Power Laser and Particle Beams*, 1991, 3(4):477)
- [2] 曾先才,李永生,常铁强,等.神光I强激光腔靶X光辐射烧蚀铝平面靶的理论研究[J].计算物理,1996,13(2):217. (Zeng X C, Li Y S, Chang T Q, et al. Theoretical study of radiative ablation of Al foil driven by X-ray produced in cylindrical hohlraum on Shengguang-I laser facility. *Chinese Journal of Computational Physics*, 1996, 13(2):217)
- [3] Sigel R, Tsikiris G D, Lavarenne F, et al. Experimental observation of laser-induced radiation heat waves[J]. *Phys Rev Letters*, 1990, 65(5):587.
- [4] Sigel R, Tsikiris G D, Lavarenne F, et al. Experimental investigation of radiation heat waves driven by laser-induced Planck radiation[J]. *Phys Rev A*, 1992, 45(6):3987.
- [5] Porter J L, Thiessen A R, Orzechowski T J, et al. Inertial confinement fusion quarterly report[R]. UCRL-LR. 105821-94-4, 125.
- [6] Orzechowski T J, Rosen M D, Kornblum H N, et al. The resselland mean opacity of a mixture of gold and gadolinium at high temperatures[J]. *Phys Lett*, 1996, 77(17):3545.
- [7] Edwards J, Dunne M, Riley D, et al. Time-resolved measurement of X-ray heating in plastic foils irradiated by intense soft-X-ray pulses[J]. *Phys Rev Lett*, 1991, 67(27):3780.
- [8] Endo T, Shiraga H, Kato Y. Quasistationary model for determination of ablation parameters in soft-X-ray-driven low-to medium Z plasma ablation[J]. *Phys Rev A*, 1990, 42(2):918.
- [9] Kaiser N W, Meyer-ter-Vehn J, Ramis R. *Laser and Particle Beams*, 1991, 9(3):759.
- [10] Piriz A R, Tomasel F G. Heat waves driven by thermal radiation in tamped flows[J]. *Phys Rev A*, 1992, 45(12):8787.
- [11] Edwards J, Barrow V, Willi O, et al. Measurement and analysis of radiation transport in laser-irradiated targets[J]. *Europhys Lett*, 1990, 11(7):631.

## Comparison of results between numerical simulation and experiment for radiative ablation of CH foil

SHENGJia-tian<sup>1</sup>, YANGJia-min<sup>2</sup>, LI Yur-sheng<sup>1</sup>, DING Yao-nan<sup>2</sup>, FENG Ting-gui<sup>1</sup>,  
JIANG Shao-en<sup>2</sup>, ZHANG Li-fa<sup>1</sup>, LI Meng<sup>1</sup>

(1. *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China;*

2. *Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China)*

**Abstract:** The radiation ablation experiments of CH foils are simulated using the experiment radiation flow in the hohlraum by FD radiation transfer code RDMG. The results of simulation show that influence of NonLTE radiation source on the ablation of CH foil is very obvious. The results of simulation and experiment including radiation flow total intensity and the variation of radiation temperature with time at the rear of CH foil, as well as the time delay of 400eV photon arriving at the rear of CH foil are consistent basically.

**Key words:** radiation transfer; radiation ablation; radiation flow