

## 前沿领域综述

## 烧蚀 RT 不稳定性 X 射线分幅诊断研究进展\*

曹柱荣<sup>†</sup> 缪文勇 董建军 袁永腾 杨正华 袁铮  
张海鹰 刘慎业 江少恩 丁永坤

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2010年9月18日收到; 2011年6月19日收到修改稿)

在神光 II 装置上, 利用高动态范围高性能 X 射线分幅相机开展了辐射驱动烧蚀 RT 不稳定性面背光实验研究. 在神光 II 8 路 2ns 辐射源和第九路 Mo 背光条件下, 利用二维时空照相获得了周期 20  $\mu\text{m}$ 、初始扰动 1  $\mu\text{m}$  烧蚀 RT 样品清晰的增长过程, 并通过掺 Br 比例 1.1% 样品观测到 RT 非线性增长的结果. 实验为惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) RT 不稳定性定量表征和数值模拟奠定了良好的基础.

**关键词:** RT 不稳定性, X 射线分幅相机, ICF

**PACS:** 52.57.Fg, 52.70.La, 07.68.+m

## 1 引言

惯性约束聚变 (ICF) 内爆中的流体是不稳定的, 尤其要研究 Rayleigh-Taylor (RT)、Richtmyer-Meshkov (RM) 和 Kelvin-Helmholtz (HK) 这三种不稳定性. 当轻流体加速重流体, 或重力场中轻流体支撑重流体时, 流体界面是 RT 不稳定的; 当冲击波通过存在扰动的流体界面时, 其界面是 RM 不稳定的; 当流体界面存在切向速度差时, 其界面是 HK 不稳定的. 这些不稳定性在天体物理、Z-pinch 内爆、海洋混合层、大气、地质、燃烧和爆炸、结晶等众多领域也广泛存在<sup>[1-3]</sup>.

ICF 流体不稳定性的研究始于上世纪 70 年代. 理论研究以线性稳定性分析为主, 提出了越来越精确的模型, 对烧蚀致稳给出了更合理的物理解释. 90 年代以来, 在美国国家点火装置 NIF 的牵引下, ICF 流体不稳定性的研究得到蓬勃发展. 由于 ICF 实现点火的激光器能量限制, 需要通过抑制流体不稳定性提高内爆效率. 因此定量模拟内爆中流体不稳定性的增长, 需要进行各种流体不稳定性增长的实验, 并对模拟结果进行定量考核<sup>[1]</sup>. 同时实验的

定量诊断技术大大提高, 巨型超级计算机也快速发展, 为流体不稳定性研究提供了很好的条件.

不同波长扰动模的增长, 对 ICF 内爆有不同的影响. 大于 80 的高球谐模的增长, 对外壳的破裂起主要作用; 小于 20 的低球谐模的增长, 容易导致扰动从烧蚀面耦合到内界面, 对 ICF 的点火和燃烧产生危害; 20—80 的中等球谐模的增长, 在加速阶段容易形成向内运动的大气泡, 使内界面发生严重变形, 进而在减速阶段形成向热斑快速运动的冷尖顶, 破坏点火热斑的形成<sup>[1-4]</sup>.

本工作针对精密 RT 物理实验对动态范围和高时空分辨的需要, 发展了基于高分辨高动态范围的分幅相机, 并在神光 II 装置上获得了较好的 RT 物理结果.

## 2 实验原理

激光 ICF 中, 线性和弱非线性阶段的流体界面扰动幅度大致在  $\mu\text{m}$  及以下尺度, 难以直接测量. 因此, 通常采用面向背光照相 (face-on radiography)

\* 国家自然科学基金 (批准号 10905050) 资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: cao33jin@yahoo.com.cn

方法: 背光源和观测系统在薄膜样品的正面, 因而称为面向背光照相, 界面的扰动幅度在背光像观测系统记录面上就转换为光强的调制度大小 [4].

假设背光源的强度是均匀的,  $t$  时刻样品的扰动 (调制) 幅度为  $2a(t)$ , 如图 1 所示. 由于扰动幅度以指数形式影响光强变化, 因此, 如果选择适当能区的背光源, 就可以将难以直接测量的小扰动幅度

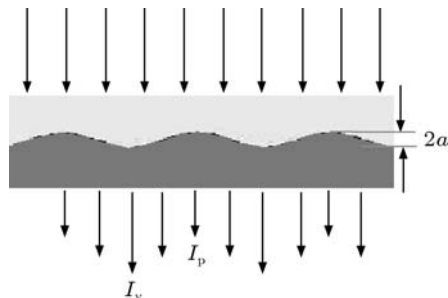


图 1 RT 不稳定性面背光照相原理

变化转换为较为容易测量的光强变化. 因为轻流体为烧蚀等离子体, 对背光源 X 射线基本透明, 背光 X 射线通过调制薄膜波峰后的强度  $I_p(t)$  和通过调制薄膜波谷后的强度  $I_v(t)$  有如下关系:

$$I_p(t) = I_v(t) e^{-\mu_\rho \rho 2a(t)}, \quad (1)$$

式中,  $\mu_\rho$  是样品质量吸收系数,  $\rho$  为样品密度, 并且假设  $\mu_\rho$  和  $\rho$  都不随时间变化. 则  $t$  时刻样品的扰动幅度为

$$2a(t) = \frac{1}{\mu_\rho \rho} \ln \frac{I_v(t)}{I_p(t)}. \quad (2)$$

$t$  时刻样品的扰动幅度与不稳定性增长率的关系为

$$a(t) = a_0 \cdot e^{\int \gamma(t) dt} = a_0 \cdot \text{GF}, \quad (3)$$

式中,  $a_0$  为扰动的初始幅度, 由靶测量可以给出.  $\gamma(t)$  为不稳定性的增长率,  $\text{GF}(t)$  称为不稳定性的增长因子. 设  $I_p(t)$  和  $I_v(t)$  比值为  $X(t)$ , 增长因子可写为

$$\text{GF}(t) = \frac{a(t)}{a_0} = \frac{1}{a_0 \mu_\rho \rho} \ln \frac{I_v(t)}{I_p(t)} = \frac{1}{a_0 \mu_\rho \rho} \ln X(t). \quad (4)$$

在实验系统中, 由于成像系统的空间分辨对于物方对比度具有调制效果, 真实的对比度永远比实际测量的对比度大. 也正因为这样, 所以在研究一维度 RT 不稳定性物理实验中, RT 样品都是采用一定周期的正弦调制结构, 物方正弦调制结构的对比度经过成像系统的调制传递得到像方的对比度. 设物方对比度为  $M(t)$ , 成像系统在调制样品周期  $\lambda$  处的调制传递函数为 MTF, 则像方的对比度

为  $M'(t)$  为

$$\begin{aligned} M'(t) &= \frac{1 - X'(t)}{1 + X'(t)} = \text{MTF} \cdot M(t) \\ &= \text{MTF} \cdot \frac{1 - X(t)}{1 + X(t)}. \end{aligned} \quad (5)$$

通过相同实验系统下周期为  $\lambda$  的静态样品背光照相获得系统 MTF, 通过动态 RT 实验得到的峰谷强度比给出  $M'(t)$ , 最后求解  $X(t)$ . 将  $X(t)$  代入 (4) 式即得到  $\text{GF}(t)$ . 需要假设成像系统工作在线性范围, 则此时测量的 MTF 包含有背光源、针孔或者其它分光元件、分幅相机以及 CCD 相机等全系统的空间调制传递.

在读取实验获得的峰谷强度比时, 需要考虑一定时间分辨下的单幅图像空间强度变化. 由于实验可以在单幅图像获得多个周期的峰或谷强度值, 所以峰、谷强度值可以结合峰/谷位置背光强度比和峰/谷位置实测强度值进行统计给出. 设单幅图像可读取周期数为  $n$ , 峰/谷位置对应的背光强度比为  $\eta_{\text{BK}}(t, X_i, Y_i)$ , 则  $t$  时刻峰/谷位置的强度可以写为

$$I'_p(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{\text{BK}}(t, X_i, Y_i) I'_p(t, X_i, Y_i), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I'_v(t) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{\text{BK}}\left(t, X_i + \frac{1}{2}\lambda, Y_i\right) \\ &\quad \times I'_v\left(t, X_i + \frac{1}{2}\lambda, Y_i\right). \end{aligned} \quad (7)$$

对于一维度正弦调制膜的 RT 照相实验, 与调制方向正交的  $Y$  方向可以进行直接的有效背光面统计, 也就是说,  $Y$  方向统计长度可以是背光长度, 也可以根据实际图像处理要求进行选择. 由此可以由三个实测量和三个已知量给出  $\text{GF}$  的表达式为

$$\text{GF}(t) = \frac{1}{a_0 \mu_\rho \rho} \ln \frac{\text{MTF} - \frac{I'_v(t) - I'_p(t)}{I'_v(t) + I'_p(t)}}{\text{MTF} + \frac{I'_v(t) - I'_p(t)}{I'_v(t) + I'_p(t)}}. \quad (8)$$

由此可见, 面向背光照相诊断烧蚀 RT 不稳定性的难度主要集中在三个方面, 一是  $\mu\text{m}$  级的扰动周期对应诊断系统空间分辨的要求, 二是低扰动幅度小光学厚度以及有限亮度背光源等条件对应的实验对诊断系统动态范围的要求, 三是辐射烧蚀动态过程对诊断系统时间分辨的要求.

### 3 实验设计

采用面向背光照相测量流体不稳定性增长因

子的方法中, 需要通过背光图像中的 X 射线强度调制反推样品面密度及扰动幅度的调制. 但是背光源均匀性、观测系统的光强调制度以及背光源非理想单色性等因素对反推结果会有影响, 因此, 要想获得不稳定性增长的定量数据, 必须考虑这些因素的影响.

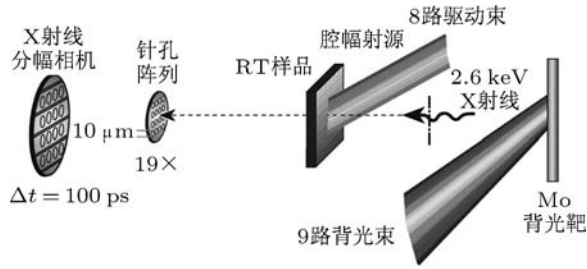


图 2 神光 II 装置上烧蚀 RT 增长测量实验排布

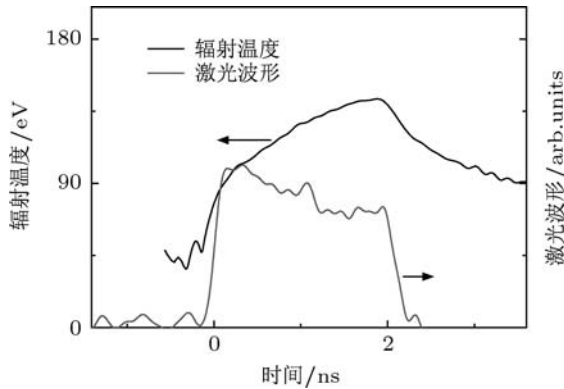


图 3 典型的神光 II 装置 2 ns 辐射源波形

采用分幅相机可以记录在 2 ns 范围获得 16 个时间点的二维扰动图像, 这样的二维度高时空记录系统有助于实验的定量分析 [5-8]. 实验排布如图 2 所示, 单个针孔像落在分幅相机微带上某个位置, 通过高压脉冲选通此位置, 对光电子进行门控, 而后通过 MCP 对光电子增益, 增益电子再被加速后轰击荧光屏, 将门控的 X 射线信号最终转化为可见光. 可见光信号被 CCD 接收记录

后即为某时刻曝光的分幅像, 在微带上可排列 16 个针孔像, 则可以获得 16 个时刻的二维度图像. 分幅相机单幅图像的时间分辨力为 100 ps, 空间分辨 281 p/mm (@MTF=10%). 针孔直径 10 μm, 放大倍数为 19, 可见光 CCD 记录系统为 4k 阵列, 单位像元 9 μm. 整个成像系统动态范围可以达到 10<sup>3</sup> 以上 [5,6].

烧蚀 RT 样品采用 CH 掺 Br 材料. 背光源采用第九路打击 Mo 产生 2.6 keV 线谱辐射背光源. 第九路条件为三倍频, 能量 1000 J, 脉宽 1 ns. 辐射烧蚀采用神光 II 8 路驱动腔靶实现, 8 路激光条件为三倍频, 单路能量 300 J, 脉宽 2 ns. 图 3 为典型的神光 II 装置 2ns 辐射源 Tr 波形, 图中还画出了辐射温度波形与 8 路激光脉冲波形的时间关系.

### 4 实验结果与分析

图 4 为周期 20 μm、初始扰动 1 μm RT 样品的分幅相机图像, 图中给出了第 95 发 6 个典型时刻的增长图像, 时间点为相对 8 路前沿的时间延迟. 该发次第九路激光参数为 3 倍频, 能量 1200 J, 脉宽 2 ns, 加蝇眼透镜, 照射背光靶中心, 背光靶采用 Mo. 分幅相机滤片为 20 μm 的 Be, 主要为抑制辐射驱动腔等离子体的软 X 射线背景, 对于九路背光灯 Mo 线中心能点, 其透过率为 85%. 烧蚀 RT 样品为 CH 掺 Br 3% 的材料.

由图 4 可以看到, 在辐射烧蚀 RT 样品 2.3 ns 开始明显的增长, 在 2.8 ns 增长达到峰值. 静态打靶得到  $MTF_{\lambda=20 \mu m} = 0.23$ , 由 (8) 式, 可得  $GF_{t=2.8 ns} = 3.8$ . 说明对于该 RT 样品, 神光 II 2 ns 辐射源的烧蚀增长主要发生在驱动源结束后的几百 ps 内, 也就是辐射温度达到最大以后的时间. 该系统对于大周期, 如 50 μm 和 75 μm 周期的 RT 扰动样品, 观测结果更清晰, 并且可以更好的定量分析.

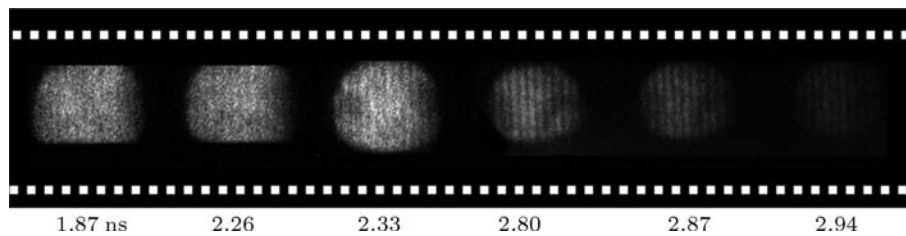


图 4 周期 20 μm、初始扰动幅度 1 μm 烧蚀 RT 样品的分幅图像

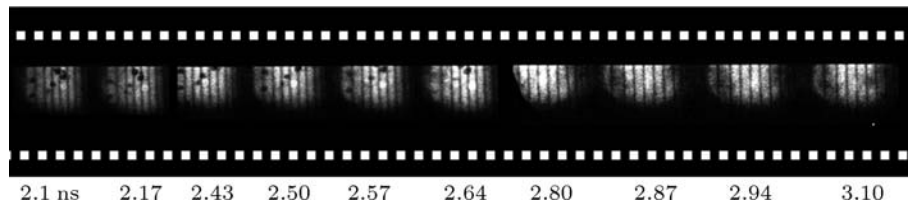


图5 掺 Br 1% 烧蚀 RT 样品的分幅图像

烧蚀 RT 不稳定性的非线性增长, 在内爆加速阶段和减速阶段, 对 ICF 的内爆和点火都有重要影响. 加速阶段的模耦合会加强线性增长峰值附近的扰动模增长, 导致壳的变形和破裂. 减速阶段的模耦合增大冷 DT 的穿透, 破坏对称压缩, 迅速降低中心区温度, 很敏感地影响出中子数, 对点火产生严重危害. 因此控制 RT 非线性发展是至关重要的. 由于问题的复杂性, 其理论研究刚刚开始, 目前实验研究工作也很少.

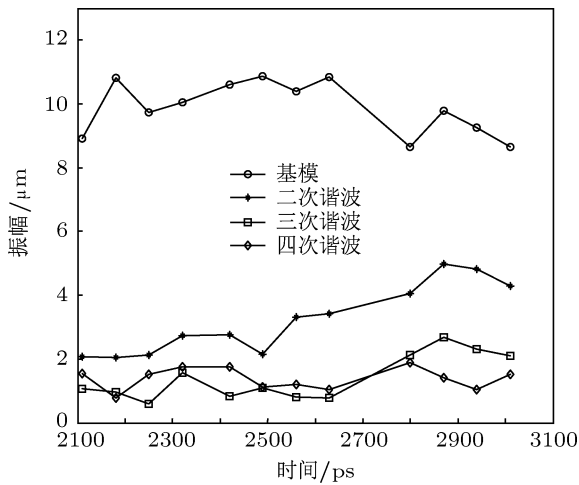


图6 第 96 发次扰动傅里叶谱的高次谐波结果

本实验通过扰动样品掺杂比例的控制, 初步获得了烧蚀 RT 不稳定性的非线性增长结果. 典型结果如图 5 所示, 图中给出了第 96 发次从加源 2.1 ns 到 3.1 ns 的 10 幅分幅像. RT 样品的周期  $50 \mu\text{m}$ , 初始扰动幅度  $2.25 \mu\text{m}$ , 掺 Br 原子比为 1.1%. 由图可见, 对于该扰动样品, 在加源 2.1 ns 时就进入了非线性增长阶段.

在界面扰动的空间特征上, 前期尖刺和气泡显示出等宽的正弦分布, 而在扰动发展后期 2.1 ns 后, 呈现尖刺窄、气泡宽的特征, 表现出明显的高次谐波特征. 对扰动空间分布做傅里叶分解, 结果如图 6 所示. 由图 6 可以清楚地看出, 扰动傅里叶谱的明显含有四次谐波成分, 进一步确认了非线性增长过程中高次谐波的产生.

## 5 结论

扰动最大线性增长波长至增长截止波长之间的短波长扰动增长数据, 由于对 ICF 点火靶数值模拟程序的物理建模和参数十分敏感, 可用于定量校核 ICF 点火靶设计程序, 因此建立短波长周期扰动的实验观测能力非常重要. 利用高动态范围高性能分幅相机在神光 II 装置上开展了辐射驱动烧蚀 RT 的不稳定性面背光实验研究. 在 2 ns 辐射源和 Mo 背光条件下, 首次获得周期  $20 \mu\text{m}$ 、初始扰动  $1 \mu\text{m}$  烧蚀 RT 增长过程的二维分幅图像. 实验还通过掺 Br 比例 1.1% 样品观测到 RT 非线性增长的结果, 并得到四次谐波成分, 为 RT 非线性物理提供了实验基础. 通过界面扰动增长定量表征技术能力的建立, 不仅可以获得烧蚀 RT 单模线性增长因子的数据, 还可用于研究多模 RT 不稳定性增长、烧蚀 RT 弱非线性增长以及各种预热、掺杂等因素对 RT 不稳定性的影响.

感谢北京应用物理与计算数学研究所吴俊峰博士和叶文华研究员的理论指导, 感谢中物院激光聚变研究中心制靶人员的辛勤劳动, 感谢神光 II 激光装置运行组的高效运行.

- [1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [2] Campbell E M, Hogan W J 1999 *Plasma Phys. Control. Fusion* **41** B39

- [3] Lindl J D 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [4] Ye W H, Zhang W Y, Chen G N, He X T 1999 *High Power Laser and Particle Beams* **11** 613 [叶文华, 张维岩, 陈光南, 贺贤土 1999 强激光与粒子束 **11** 613]
- [5] Cao Z R, Li S W, Jiang S E, Ding Y K, Liu S Y, Yang J M, Zhang

- H Y, Yang Z H, Li H, Yi R Q, He X A 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7170 (in Chinese) [曹柱荣, 李三伟, 江少恩, 丁永坤, 刘慎业, 杨家敏, 张海鹰, 杨正华, 黎航, 易荣清, 何小安 2010 物理学报 **59** 7170]
- [6] Cao Z R, Zhang H Y, Dong J J, Yuan Z, Miao W Y, Liu S Y, Jiang S E, Ding Y K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 045212 (in Chinese) [曹柱荣, 张海鹰, 董建军, 袁铮, 缪文勇, 刘慎业, 江少恩, 丁永坤 2011 物理学报 **60** 045212]
- [7] Cao Z R, Ding Y K, Liu S Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2640 (in Chinese) [曹柱荣, 丁永坤, 刘慎业 2010 物理学报 **59** 2640]
- [8] Cao Z R, Zhang H Y, Yi R Q, Li H, Dong J J, Gu Y Q, Liu S Y, Ding Y K 2008 *High Power Laser and Particle Beams* **20** 948 (in Chinese) [曹柱荣, 张海鹰, 易荣清, 黎航, 董建军, 谷渝秋, 刘慎业, 丁永坤 2008 强激光与粒子束 **20** 948]

## Experiment progress of ablative Rayleigh-Taylor instability based on X-ray framing camera\*

Cao Zhu-Rong<sup>†</sup> Miao Wen-Yong Dong Jian-Jun Yuan Yong-Teng  
 Yang Zheng-Hua Yuan Zheng Zhang Hai-Ying Liu Shen-Ye  
 Jiang Shao-Eng Ding Yong-Kun

(Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 18 September 2010; revised manuscript received 19 June 2011)

### Abstract

Using high dynamic range X-ray framing camera, the radiation driven ablative Rayleigh-Taylor instability facing backlight radiography on SHENGUANH (SG) II device is studied. In the SG II that has eight beams with the 2 ns laser pulse and the ninth beam for Mo backlight, two-dimensional space-time ablation RT growth process for the cycle 20  $\mu\text{m}$  and the initial perturbation 1  $\mu\text{m}$  are observed clearly, and the non-linear growth process is also observed by the doping Br ratio of 1.1% in samples. The result lays a good foundation for quantitative characterization and numerical simulation of RT instability in inertial confinement fusion (ICF) experiments.

**Keywords:** Rayleigh-Taylor instability, X-ray framing camera, inertial confinement fusion

**PACS:** 52.57.Fg, 52.70.La, 07.68.+m

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10905050).

<sup>†</sup> E-mail: cao33jin@yahoo.com.cn