

辐射驱动内爆流线实验测量*

董建军^{1)†} 曹柱荣¹⁾ 杨正华¹⁾ 陈伯伦¹⁾ 黄天暄¹⁾ 邓博¹⁾ 刘慎业¹⁾
江少恩¹⁾ 丁永坤¹⁾ 伊圣振²⁾ 穆宝忠²⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (同济大学物理系, 上海 200092)

(2011年9月21日收到; 2012年1月9日收到修改稿)

内爆速度的测量是惯性约束聚变研究中的核心问题, 是判断聚变点火反应的关键物理量. 在神光 II 激光装置上, 利用 KB 显微镜配合时间分辨为 10 ps 的条纹相机, 对 1600 J 激光能量注入, 3 倍频, 脉宽为 1 ns 黑腔辐射驱动 CH 靶球, 获得了清晰的辐射驱动内爆流线轨迹 X 射线图像. 通过流线轨迹图像给出了最大内爆速度为 160 km/s. 利用 Multi1D 程序对内爆压缩流线和壳层速度变化进行了模拟, 实验数据和理论模拟较符合.

关键词: KB 显微镜, X 射线条纹相机, 辐射驱动, 内爆流线

PACS: 52.70.-m

1 引言

KB 显微镜是一类掠射反射式成像系统, 1948 年由 Kirkpatrick 和 Baze^[1] 在实验室里发明的一种可以对 X 射线成像的设备. 经过近半个多世纪的发展此类设备在 X 射线天文物理和惯性约束聚变 (ICF) 研究领域得到了广泛的应用^[2,3]. KB 显微镜可以实现高空间分辨 X 射线成像, 主要应用于内爆物理实验和流体力学不稳定性实验^[4-6]. 内爆流线的精密测量可以给出内爆压缩壳层的速度, 该速度与点火阈值的大小和流体不稳定性控制密切相关^[7,8], 是点火物理的关键物理量. 通过内爆压缩流线可以给出内爆速度, 壳层剩余质量等物理量^[9]. 2008 年美国 OMEGA 装置上利用 KB 显微镜对内爆流线进行了测量, 获得了流线轨迹图像^[10], 但图像不是很清晰. 国内关于流线测量主要是利用针孔配 X 射线条纹相机进行测量^[11].

本文通过 Cr/C 多层膜 KB 显微镜配合 X 射线条纹相机对辐射驱动内爆压缩流线进行了测量,

利用 KB 显微镜系统获得了内爆压缩过程流线轨迹, 通过数据拟合给出了内爆速度随时间的变化曲线, 从该曲线求出了内爆速度, 即最大内爆速度. 利用 Multi1D 程序计算了流线轨迹和壳层内界面速度, 并与实验结果进行比较. 本文给出的实验测量方法和数据处理方法为细致分析内爆压缩过程奠定了一定的基础.

2 内爆流线实验测量

KB 显微镜是一种非对称非共轴系统, 它的光轴是一条空间折线, 图 1 中 A 和 B 分别代表目标和像, 物点和像点的连线 AB 称为膺轴, 是一条虚拟的直线, 这条直线可以帮助我们将 KB 系统通过空间变换把物点 A 和像点 B 置于一水平线上, 这样对系统整体调节会很方便. KB 镜的曲率半径为 2m, 镜子长度为 10 mm, 放大倍数 15 倍, 掠射角为 1.0° 左右, 表面镀有 Cr/C 多层膜系. 物距为 186 mm, 收光立体角为 8.8×10^{-7} sr.

* 国家自然科学基金 (批准号: 10905050) 和中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2010B0102015) 资助的课题.

† E-mail: d.dragonfly@sina.com

X 射线条纹相机具有 10 ps 的时间分辨, 100 μm 的空间分辨, 在 ICF 研究领域一直是重要的时空诊断设备. 图 2 是内爆流线测量原理示意图.

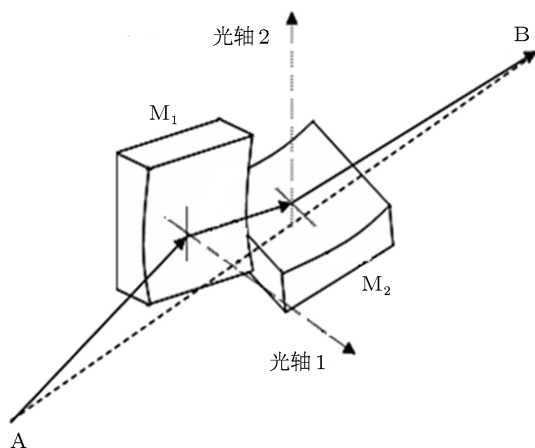


图 1 KB 显微镜结构

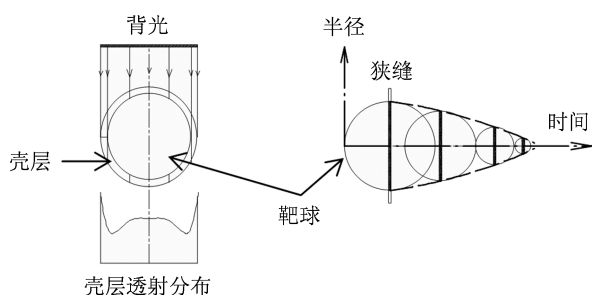


图 2 内爆流线测量原理示意图

如图 2 所示, 背光辐照球形靶, 部分 X 射线被壳层吸收形成球形靶的阴影图像, 压缩过程中球形靶随时间在变小, 所以其阴影像也在变小, 通过 KB 显微镜系统我们将此阴影图像目标成像于 X 射线条纹相机的阴极狭缝上, 要保证目标图像的最大弦和阴极狭缝重合, 这样条纹相机在每个扫描时刻记录到的均为球形靶最大弦对应部分的吸收阴影图像, 即压缩球形靶的半径变化, 通过这样的测量可以真实反映内爆流线轨迹. 由于条纹相机的阴极狭缝宽度只有 100 μm , 实验需要球形靶阴影图像的最大弦和狭缝重合, 为此我们利用成像板 (IP) 作辅助监测, 将 IP 板紧贴于条纹相机阴极狭缝位置, 在 IP 板上开 1.5 mm 的窗口, 使该窗口和条纹相机阴极狭缝对齐, 这样靶球的一维扫描图像由条纹的阴极记录, 靶球的二维时间积分图像由 IP 板记录. 通过成像板记录的靶球的时间积分像相对于阴极狭缝

的位置来判断靶球最大弦偏离阴极狭缝的位置, 从而对阴极狭缝的调节做出判断.

流线测量实验布局如图 3 所示, 成像目标为 ϕ 250 μm , 壳层厚度 15 μm 的 CH 球, 内充 3—5 atm (1 atm = 1.01325 $\times 10^5$ Pa) 的 DD 气体, 靶球置于柱腔的中心位置, 柱腔为 ϕ 760 $\mu\text{m} \times 1350 \mu\text{m}$, 八路激光从柱腔两端同步注入, 每路提供能量为 200 J, 3 倍频, 1 ns, 第九路背光驱动束能量为 1000 J, 3 倍频, 2 ns, 相对八路延时 200 ps, 背光通过柱腔前后开的 450 $\mu\text{m} \times 450 \mu\text{m}$ 的方形诊断窗口辐照靶球, KB 对靶球的透射图像成像, 由 X 射线条纹相机的阴极记录. 图 4(a) 和 (b) 分别是 IP 板

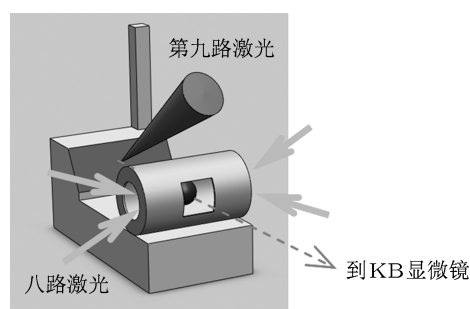


图 3 内爆流线测量实验布局

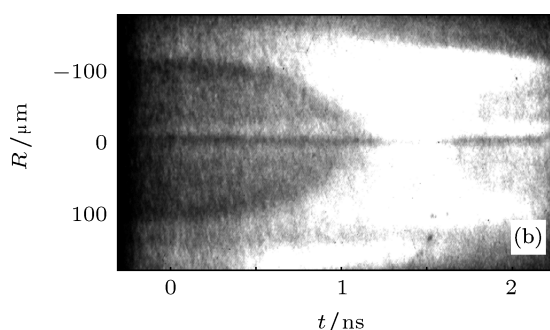
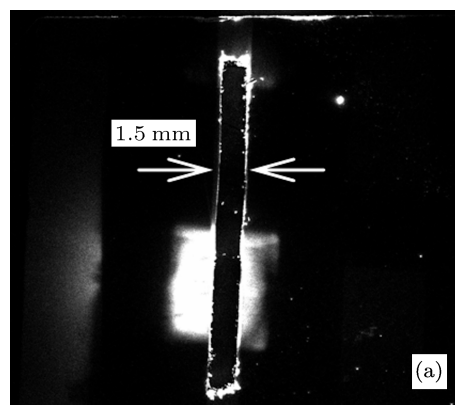


图 4 KB 显微镜配条纹相机测量的实验结果 (a) IP 板记录的图像; (b) 条纹相机记录的图像

记录的目标时间积分像和 KB 显微镜配条纹相机测得的内爆流线实验图像. 从图 4(a) 中可确定靶球最大弦偏离阴极狭缝约 $36.6 \mu\text{m}$.

3 实验数据处理及不确定度分析

通过流线图像的数据处理和读取吸收最强位置的坐标可以获得流线轨迹, 将实验结果和 Multi1D 计算进行了比较, 结果如图 5 所示. 从图中可以看出二者比较符合, 同时我们将柱腔辐射温度曲线画在了同一坐标下, 辐射温度最大达到 180eV , 最大压缩时刻比辐射温度最大时刻晚约 300ps . 同时利用 Multi1D 模拟了靶球壳层的速度, 如图 6 所示, 最大内爆速度约为 160 km/s . 可以看到靶球壳层速度在加速阶段和模拟的结果比较符合, 但在壳层减速阶段, 二者有较大的偏差, 这是因为在实验测量中靶球的最大弦位置和阴极狭缝并不重合, 二者具有 $36.6 \mu\text{m}$ 的偏差, 因此我们记录到的是壳层的某段截弦的位置 $L(t)$, 如图 7 所示, δ 为截弦 $L(t)$ 与最大弦的距离, 内爆流线轨迹应该是 $R(t)$, 由图 7 可知二者的关系为

$$R(t) = \sqrt{L(t)^2 + \delta^2}. \quad (1)$$

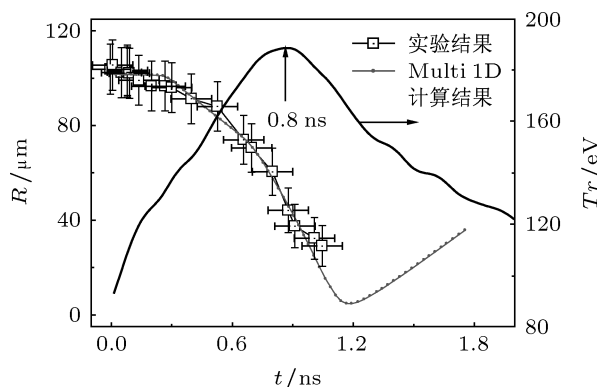


图 5 流线实验结果和 Multi1D 计算结果的比较

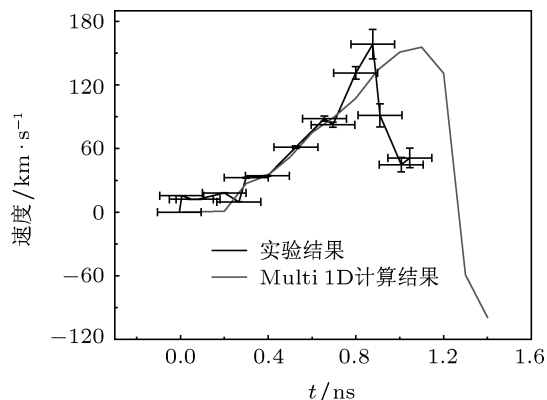


图 6 实验测得的内爆速度和 Multi1D 计算结果的比较

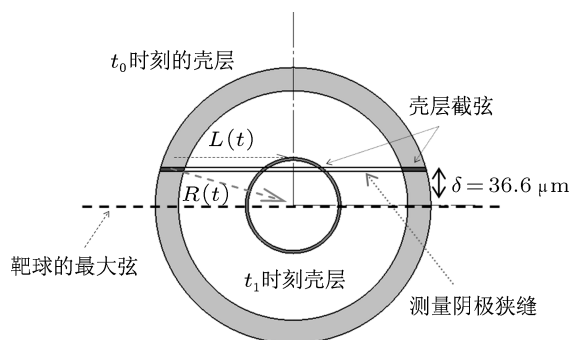


图 7 流线测量最大弦偏离阴极狭缝为 δ 的分析图

内爆速度为流线轨迹对时间的导数, (1) 式对时间求导为

$$V(t) = \frac{L(t)}{\sqrt{L(t)^2 + \delta^2}} \frac{\partial L(t)}{\partial t}. \quad (2)$$

由合成不确定度的评估方法, 则流线轨迹的不确定都可以下式确定:

$$U_R = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial L} u_L\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \delta} u_\delta\right)^2 + u_{\text{other}}^2}, \quad (3)$$

内爆速度的不确定都表示为

$$U_V = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial L} u_L\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \delta} u_\delta\right)^2 + 2\left(\frac{1}{\Delta t}\right)^2 u_L^2 + 2\left(\frac{\Delta L}{\Delta t}\right)^2 \left(\frac{u_t}{\Delta t}\right)^2}, \quad (4)$$

其中 u_L 表示测量量 $L(t)$ 的不确定度, u_δ 表示偏离最大弦的不确定度, u_t 表示时间的不确定度, u_{other} 表示其它因素引起的固有的不确定度, 如仪器自身的影响, 实验条件的影响等等. ΔL 和 Δt 是相

邻两个时刻的测量值 $L(t)$ 的差和相邻两个时刻差. 从图 7 的分析可以看出, 压缩时刻越大, 则测量量 $L(t)$ 的不确定度越大, 在内爆压缩后期, 速度的不确定度增大导致了模拟结果和实验结果在内爆

后期存在较大的差异.

4 结论

本文利用 KB 显微镜配合 X 射线条纹相机测量了内爆靶球压缩的 X 射线图像, 从靶球的 X 射线图像读取吸收最大的位置, 给出了内爆流线轨迹, 由流线轨迹求得了在 SGII 激光装置上激光能

量为 1600 J, 3 倍频, 脉宽为 1 ns 情况下的标准黑腔驱动的 CH 靶球的最大内爆速度为 160 km/s, 并与 Multi1D 模拟的结果进行了比较, 二者在加速阶段较符合, 但在内爆减速阶段存在较大差异, 主要是由于最大弦和条纹阴极狭缝存在偏差引起的. 给出了流线轨迹和内爆速度的不确定度表达式.

感谢 SGII 激光装置运行人员的大力协同以及制靶人员的精诚合作.

-
- [1] Kirpatrick P, Beaz A V 1948 *J. Opt. Soc. Am.* **38** 766
- [2] Attwood D T, Zhang J 2004 *Soft X-ray and extreme ultraviolet radiation: principles and applications* (1st Ed.) (Beijing: Higher Education Press) p83–84 (in Chinese) [阿特伍德著, 张杰译 2004 软 X 射线与极紫外辐射的原理及应用 (北京: 高等教育出版社) 第 83–84 页]
- [3] Rosch R, Boutin J Y, le Breton J P, Gontier D, Jadaud J P, Reverdin C, Soullie G, Lidove G, Maroni R 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 033704
- [4] Gotchev O V, Hayes L J, Jaanimagi P A, Knauer J P, Marshall F J, Meyerhofer D D 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 5056
- [5] Budil K S, Remington B A, Peyser T A, Mikael K O, Miller PL, Woolsey N C, Wood-Casey W M, Rubenchik A M 1996 *Phys. Rev. Lett.* **76** 4536
- [6] Aglitskij Y, Velikovich A L, Karasik M, Serlin V, Pawley C J, Schmitt A J, Obenshain S P, Mostovych A N, Gardner J H, Metzler N 2001 *Phys. Rev. Lett.* **87** 265001
- [7] Betti R, Zhou C D 2005 *Phys. Plasmas* **12** 110702
- [8] Lindl D J, Amendt P, Richard L, Berger S, Glendinning G, Siegfried H, Hann, S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L 2004 *Phys. Plasmas* **11** 459
- [9] Hicks D G, Spears B K, Braun D G, Olson R E, Sorce C M, Celliers P M, Collins G W, Landen O L 2010 *Phys. Plasmas* **17** 102703
- [10] Bourgade J L, Trousse P, Casner A, Huser G, Sangster T C, Pien G, Marshall F J, Fariaud J, Remond C, Gontier D, Chollet C, Zuber C, Reverdin C, Richard A, Jaanimagi P A, Keck R L, Bahr R E, Armstrong W J, Dewandel J, Maroni R, Aubard F, Angelier B, Cote C Y, Magnan 2008 *Rev. Sci. Instrum.* **79** 10E904
- [11] Jiang S E, Ding Y K, Miao W Y, Liu S Y, Zhen Z J, Zhang B H, Zhang J Y, Huang T X, Li S W, Cheng J B, Jiang X H, Yi R Q, Yang G H, Yang J M, Hu X, Cao Z R, Huang Y X 2009 *Science in China G* **39** 1571 (in Chinese) [江少恩, 丁永坤, 缪文勇, 刘慎业, 郑志坚, 张保汉, 张继彦, 黄天暄, 李三伟, 陈家斌, 蒋小华, 易荣清, 杨国洪, 杨家敏, 胡昕, 曹柱荣, 黄翼翔 2009 中国科学 G 辑 **39** 1571]

Measurement of implosion trajectory for hohlraum-radiative-driven*

Dong Jian-Jun^{1)†} Yang Zheng-Hua¹⁾ Cao Zhu-Rong¹⁾ Cheng Bo-Lun¹⁾
Huang Tian-Xuan¹⁾ Den Bo¹⁾ Liu Sheng-Ye¹⁾ Jiang Shao-En¹⁾
Ding Yong-Kun¹⁾ Yi Sheng-Zheng²⁾ Mu Bao-Zhong²⁾

1) (Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 21900, China)

2) (Department of Physics, Tong-Ji University, Shanghai 200092, China)

(Received 21 September 2011; revised manuscript received 9 January 2012)

Abstract

The measurement of implosion velocity is the core problem of inertial confinement fusion and it is also a key quantity of estimation of fusion ignition. A clear implosion trajectory X-ray image of hohlraum-radiative-driven CH-capsule is obtained in Sheng-GuangII laser facility with 1600 J laser energy, triple frequency and 1 ns pulse width. KB-microscope coupled with X-ray streak camera whose temporal resolution is about 10 ps is used for diagnosis. The maximal velocity of implosion is about 160 km/s which can be extracted from the experimental trajectory data. The experimental data are compared with Multi1D simulation results of velocity and both are in good agreement with each other.

Keywords: KB microscope, X-ray streak camera, radiation drive, implosion trajectory

PACS: 52.70.-m

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10905050), and the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics, China (Grant No. 2010B0102015).

† E-mail: d.dragonfly@sina.com