ICF 黑腔金泡等离子体运动研究取得进展

郭 亮¹, 李三伟¹, 李 成², 丁永坤², 曹柱荣¹, 刘慎业¹, 江少恩¹, 张保汉¹
 (1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心,四川 绵阳 621900; 2. 北京应用物理与计算数学研究所,北京 100088)

摘 要: 在神光Ⅲ主机装置,利用16 束激光注入黑腔产生二维柱对称、接近点火状态的等离子体环境。 利用一台 X 光分幅相机首次获得金泡等离子体的运动演化过程和不同时刻金、充气等离子体边界的绝对位 置。通过精密实验与二维辐射流体程序模拟结果比较,验证了改进模型的合理性和可靠性。

关键词: 惯性约束聚变; 黑腔; 金泡等离子体; 唯象模型
中图分类号: O571.44
文献标志码: A doi:10.11884/HPLPB201729.170391

在激光间接驱动的惯性约束聚变(ICF)研究中,激光照射在金腔内壁转换成 X 光驱动燃料靶丸点火燃 烧^[1]。激光弹着点处产生的金等离子体向腔内膨胀形成金泡。在两环激光照射柱腔的点火方式下,外环金泡 可能膨胀进入激光通道,阻碍内环激光传输,或影响内外环束间能量转移等激光等离子体相互作用(LPI)过 程,导致黑腔能量亏损和辐照对称性恶化最终影响点火成败^[24]。对金泡等离子体运动的模拟涉及等离子体状 态参数、电子热传导、X 光发射与吸收等多个物理过程的精确建模,是校验辐射流体程序合理性和可靠性的重 要算例。鉴于我国将依靠数值模拟外推设计点火靶,开展金泡运动的实验研究对改进理论模型、优化程序参数 具有重要意义。

最近,在神光Ⅲ主机装置上开展了一次精密黑腔实验。桶状黑腔直径和长度均为 2.8 mm,充气成分为 C₅H₁₂,16 束波长 351 nm 激光从腔下端瞄准腰部一环注入,单束方波脉宽 3 ns、能量 2700 J,弹着点功率密度 约 8×10¹⁴ W/cm²。理论模拟表明,该条件下非平衡区等离子体状态与点火设计接近。一台双频 16 分幅 X 光 相机(XFC)被首次应用在主机装置上极点,从腔上端观察金泡等离子体的向心运动过程。该相机能同时获得 0.8~1.1 keV(N 带)和 2.0~3.0 keV(M 带)两个能区的 X 光图像,时间、空间分辨分别达 50 ps 和 40 μm。

图 1 为两种充气密度下的金泡运动图像。随着激光注入,腔壁金等离子体(亮环)不断向腔内膨胀,但受到 低 Z 气体等离子体(中心暗区)阻挡,分界面因挤压碰撞导致 X 光显著增强。当气压较高时,主脉冲结束时刻 金泡边沿距中心仍有 450 μm;气压较低时,则完全聚心。通过该图像,我们能够获得精确的不同时刻金泡前沿 位置,从而与模拟结果进行直接比对。



Fig. 1 Experimental setup and X-ray images of bubble plasma 图 1 实验排布与两种气压下的金泡膨胀图像

图 2 为基于不同模型的数值模拟结果与实验观察的比较情况。平均原子模型给出的金泡运动速度比实验快,这是因为平均原子模型弱化了高激发态作用导致 X 光发射减弱,使能量更多分布在金等离子体物质能中, 引起金泡电子温度升高、尺寸变大和运动加快。改进模型通过在能量守恒方程中添加参数 C_{er}和 C_{op},以增加金

作者简介:郭 亮(1985—),男,副研究员,主要从事惯性约束聚变的实验研究; lianguo_job@163.com。

^{*} **收稿日期:**2017-09-29; **修订日期:**2017-10-27 **其合顶日**, 国家自然利誉其合志在利誉其合项日(11705190)

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(11705180)

通信作者:李 欣(1980-),男,副研究员,主要从事惯性约束聚变的理论研究; li_xin@iapcm. ac. cn。

泡区 X 光发射同时降低腔壁 X 光反照率,实现能量分布 的唯象调整。通过参数扫描,当 C_{er}=5,C_{op}=0.7 时,唯 象模型给出的金泡运动速度与实验吻合良好。

该研究结果表明,平均原子模型在模拟非平衡金泡 区等离子体状态时存在偏差。改进模型虽然不是对原子 模型直接优化,而是唯象地调整能量分布,从工程应用的 效果来看仍具有一定的合理性和可靠性,对提高点火靶 理论设计的置信度具有积极的作用。

参考文献:

[1] Lindl J, Landen O, Edwards J, et al. Review of the National Ignition Campaign 2009-2012[J]. Phys Plasmas, 2014, 21:020501.



- [2] MacLaren S A, Schneider M B, Widmann K, et al. Novel characterization of capsule X-ray drive at the National Ignition Facility[J]. Phys Rev Lett, 2014, 112:105003.
- [3] Hopkins L F, Pape S, Divol L, et al. Near-vacuum hohlraums for driving fusion implosions with high density carbon ablators[J]. *Phys Plasmas*, 2015, **22:056318**.
- [4] Hall G N, Jones O S, Strozzi D J, et al. The relationship between gas fill density and hohlraum drive performance at the National Ignition Facility[J]. Phys Plasmas, 2017, 24:052706.

Study on movement of gold bubble plasma in hohlraum

Guo Liang¹, Li Sanwei¹, Li Xin², Ding Yongkun², Cao Zhurong¹, Liu Shenye¹, Jiang Shaoen¹, Zhang Baohan¹ (1. Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China;

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: Recent experiments on Shenguang II laser facility have explored gas filled hohlraums to create plasma condition that is close to the ignition status. An X-ray framing camera was used to acquire the time-resolved movement images of the gold bubbles. The experimental results are simulated with a phenomenological model very well, demonstrating its validity and rationality.

Key words: ICF; hohlraum; gold bubble plasma; phenomenological model **PACS**: 52.57. Bc