

X 射线沿柱腔轴向能量传输实验测量

江少恩 郑志坚 成金秀 孙可煦 杨家敏 王红斌

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(1999 年 8 月 29 日收到; 1999 年 12 月 2 日收到修改稿)

对 X 射线在柱腔内的能量传递情况进行实验测量, 采用多种实验设备对 X 射线进行诊断, 获得柱腔内软 X 射线谱、X 射线强度及辐射温度的空间分布.

关键词: 柱腔, 能量传递, 辐射温度

PACC: 5255, 0560, 4440, 5270

1 引 言

间接驱动惯性约束聚变(ICF)中, 激光辐照黑腔内壁, 在那里转换为 X 射线, 然后通过辐射输运, 均匀压缩靶丸, 使其内爆. 黑腔内壁之间的辐射能量传输决定腔内的辐射温度分布(非平衡时为等效辐射温度), 并且决定腔内辐射环境的均匀性. 可见, X 射线能量传输对于间接驱动是十分重要的一环^[1-3].

虽然 ICF 的研究已发展多年, 但由于 X 射线输运物理过程的复杂性, 使得辐射输运的研究并不充分, 文献报道并不多^[4-6]. Stockl 和 Tsakiris 通过沿输运管道开诊断孔或开缝的方法, 使用绝对标定的光栅谱仪测量 X 射线谱, 进而得到等效辐射温度沿输运路径的变化分布情况^[6]. 他们所用的激光器为 Asterix IV 碘激光器(能量为 200 J, 波长为 $0.44\ \mu\text{m}$ (三倍频), 脉宽为 300 ps), 得到 X 射线等效辐射沿缝轴向分布, 测得源区温度为 154 eV, 经过 $z = 16$ ($z = z/r_0$, z 和 r_0 分别为轴向距离和柱腔半径)距离的传输, 辐射温度降低到 25 eV. 本文所采用的激光器为‘星光 II’装置, 激光条件与他们的碘激光器极不相同, 而且实验中使用的诊断设备更多, 获取的实验数据更丰富, 因而对理论模型的检验提供更多的参考数据.

本文采用在柱腔侧面开缝的方法, 测量 X 射线沿缝传播方向的空间分布, 研究 X 射线能量传递变化情况, 为间接驱动 ICF 的腔物理研究提供极其有意义的实验数据.

2 实验靶型

实验采用的两种靶为源靶和柱腔缝靶, 见图 1. X 射线辐射输运研究需要首先研究辐射源特性, 了解 X 射线输运的初始条件, 包括输运能流、辐射温度、初级辐射光谱特性. 这可以通过源靶进行研究. 其次研究 X 射线的输运过程. 从缝靶可以了解 X 射线辐射沿轴向的分布和不同位置的变化情况, 从而获取更多的物理信息.

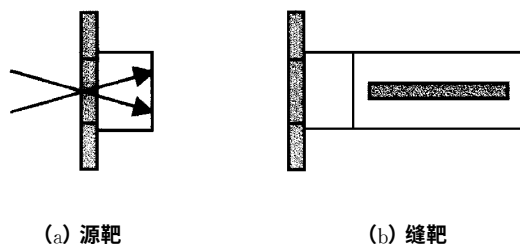


图 1 两种柱腔靶结构示意图

图 1(a)为源靶, 柱腔直径为 $400\ \mu\text{m}$, 腔长为 $300\ \mu\text{m}$. 源靶的特点是: 1) 激光正入射, 利于与理论进行比较; 2) 可以产生较为‘干净’的 X 射线源. 采用 $300\ \mu\text{m}$ 直径的注入孔, 其目的是提高激光能量注入率, 增大腔内 X 射线辐射能流. 在离注入孔 $300\ \mu\text{m}$ 的柱腔内, 用 $0.17\ \mu\text{m}$ 厚度的 Au 箔将柱腔分为源区和输运区, $0.17\ \mu\text{m}$ 厚度的金箔大于 $0.35\ \mu\text{m}$ 激光对 Au 的烧穿深度, 可以有效地阻止激光进入输运区, 确保输运区为纯 X 射线辐射输运. 在 Au 箔后加 $0.2\ \mu\text{m}$ 厚度的 CH 膜来抑制高 Z 等离子体膨胀喷射造成输运通道和缝口的堵塞.

图 1(b)为双缝结构, 在输运靶的后接部分两侧

开双缝,双缝的缝中心分别上下偏离水平线约 20° , 以确保对称安装的探测器能观测到对面腔壁发射的 X 射线. 输运缝腔长为 1.2 mm , 柱腔上的双缝长度为 1 mm , 宽度为 0.1 mm , 是观测腔内 X 射线辐射细致结构的窗口. X 射线皮秒分幅相机、X 射线条纹相机以及 X 射线 CCD 针孔透射光栅谱仪等诊断设备, 通过窗口获取腔内 X 射线辐射光谱时空信息. 缝靶结构利于多种诊断设备的排布和观测.

实验中所需要的数据为软 X 射线能谱及 X 射线总量, 所以主要用软 X 射线谱仪(SXS 仪)和透射光栅谱(TGS)仪获得软 X 射线能谱, X 射线总量由 SXS 仪和平响应 X 射线二极管(XRD)获得. 本文对 SXS, XRD 及 TGS 的测量结果进行分析.

3 实验结果及其数值模拟与分析

实验采用“星光 II” $^{3\omega_0}$ 激光打靶, 入射激光能量约为 80 J , 脉宽约为 700 ps , 激光 0° 入射, 聚焦注入. 为了便于对实验结果的分析, 现将两种靶分开讨论.

3.1 源靶

对源靶(见图 1(a)), 软 X 射线能谱仪(SXS)测得的软 X 射线能谱见图 2, 沿能量轴积分得到 X 射线能量为 15.1 J . 由多个角度分布的平响应 XRD 获得的 X 射线角分布见图 3, θ 定义为 XRD 视线与靶面法线的夹角. 由图 3 可以看到, X 射线近似于 $\cos\theta$ 分布, 即满足朗伯定律. 沿 $\cos\theta$ 积分, 得到 X 射线总量为 14.5 J , 与 SXS 仪测量的 X 射线总量相符合.

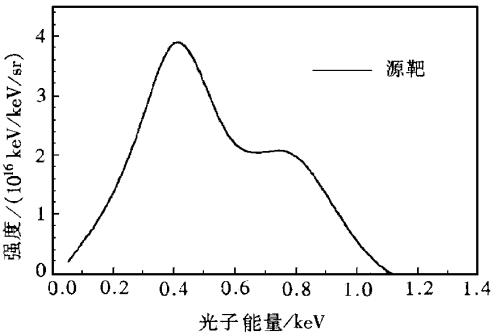


图 2 源靶 X 射线辐射能谱分布

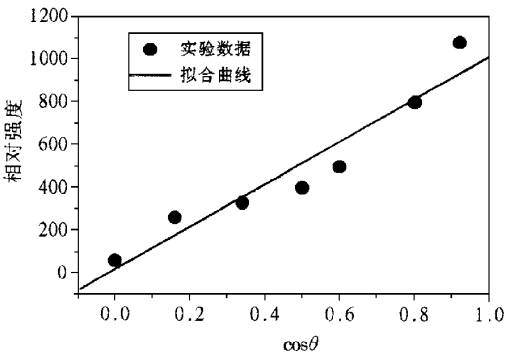


图 3 源靶 X 射线辐射角分布

3.2 缝靶

对缝靶(见图 1(b))进行 X 射线辐射特性研究实际上是研究 X 射线在输运腔中的再辐射特性, 通常腔壁不同位置将有不同的等效温度、不同的谱特征, 而等效温度和谱结构又与辐射时间紧密相关. 采用柱腔开缝的方法, 利用空间分辨能谱诊断技术观测柱腔壁辐射细致结构, 可以得到等效温度空间梯度变化.

由于沿缝靶辐射强度是变化的, 因此测量 X 射线的空间变化需要能谱测量系统具有空间分辨的能力. 为此, 在透射光栅谱仪前在一定距离的位置上与光栅的栅线垂直加一个 $20\text{ }\mu\text{m}$ 宽的成像狭缝, 这样使光栅谱仪成为既有空间分辨又有能谱分辨的光谱仪, 测量原理见图 4.

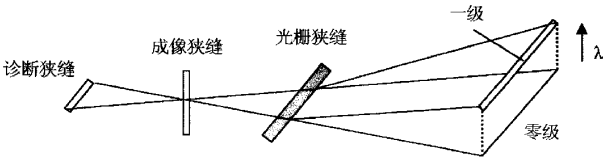


图 4 具有空间分辨和谱分辨光栅谱仪测量缝靶示意图

由 X 射线 CCD 配透射光栅谱仪获得的缝靶 X 射线辐射光谱轴向分布见图 5(a), 水平方向为空间分辨方向, 垂直方向为光谱分辨方向, 中间为光谱零级分布. 从图 5(a)可明显观测到在缝的前 $1/4$ 区域内的光谱高能成分居多, 带状结构较明显, 在缝的后半段, X 射线被多次吸收和发射, 能谱变软, 发射强度较弱.

图 5(b)为在缝的不同空间位置上 X 射线辐射光谱分布(图中的横轴为 X 射线 CCD 上的像素点), 在 $L = 25\text{ }\mu\text{m}$ 附近 (L 的值是自开缝的始点算

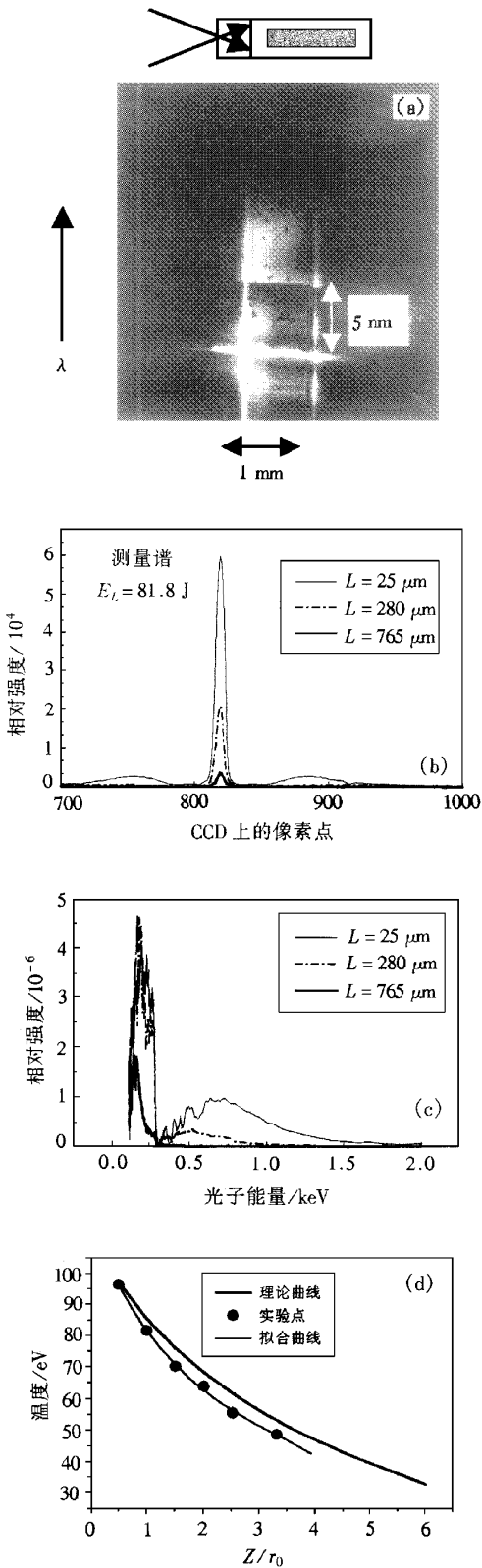


图5 沿轴向缝口 X 射线辐射光谱和温度空间分布

起, Z 的值则是自 X 射线源即 X 射线转换的 Au 箔处算起, 于是得到 $Z = L + 100 \mu\text{m}$), 出现 M 带辐射 (峰值波长约为 0.48 nm), 但强度较弱, 发射较强的峰值波长在 1.4 nm 附近. 当 $L = 765 \mu\text{m}$ 时, X 射线辐射的高能成分很少, 主要能量集中在大于 4 nm 的波长范围. 图 5(c) 为利用叠代法将获得的测量谱 (图 5(b)) 进行解谱得到的在缝的不同空间位置上 X 射线发射光谱分布. 图 5(d) 为利用解谱得到的结果计算的腔内辐射温度空间分布.

需要说明的是, 由于透射光栅谱仪是相对测量而不能给出绝对量, 为了便于分析, 并与理论进行比较和了解 X 射线沿轴向的分布情况, 将光栅测量源处 $Z = 125 \mu\text{m}$ 的相对 X 射线总量与理论计算的 X 射线总量相等, 从而得到一个比例系数, 于是将此系数乘以 $Z > 125 \mu\text{m}$ 各点光栅谱仪测量的相对 X 射线总量, 可以得到辐射强度沿轴向的分布情况, 利用 Stefan-Boltzmann 公式可以得到辐射温度的分布, 这就是图 5(d) 中实验点的结果, 图 5(d) 中还根据实验结果拟合了曲线. 可以看到实验曲线比理论曲线为低, 这是由于存在缝的缘故, 使 X 射线从缝口泄漏了一部分, 从而使辐射温度比没有缝的情况下降得更快. 平响应 XRD 观测到缝泄漏的 X 射线量为 $3.0\text{--}3.6 \text{ J}$.

4 小 结

本文对源靶和缝靶辐射的 X 射线进行测量. 由源靶得到了 X 射线能量传递的初始条件, 所得到的软 X 射线谱偏离平衡谱, X 射线角分布接近余弦函数. 由缝靶获得辐射温度沿能量传递路径的空间分布.

感谢“星光 II”运行人员和制靶人员的辛勤劳动.

[1] J. Lindl, *Phys. Plasmas*, **2** (1995), 3933.
[2] L. J. Suter *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **73** (1994), 2328.
[3] K. L. Kauffman *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **73** (1994), 2320.
[4] C. Stockl *et al.*, *Laser and Particle Beams*, **9** (1991), 725.
[5] G. D. Tsakiris *et al.*, *Phys. Fluids*, **B4** (1992), 992.
[6] C. Stockl *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **70** (1993), 943.

EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF X-RAY ENERGY TRANSPORT ALONG CYLINDRICAL CAVITY AXIS

JIANG SHAO-EN ZHENG ZHI-JIAN CHENG JIN-XIU SUN KE-XU YANG JIA-MIN WANG HONG-BIN

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

(Received 29 August 1999; revised manuscript received 2 December 1999)

ABSTRACT

X-ray energy transport along the cylindrical cavity axis is measured. Many kinds of experimental instruments are used to diagnose the X-ray radiation. The spatial distribution of soft X-ray spectra, X-ray intensities and radiation temperature are obtained.

Keywords: cylindrical cavity, energy transport, radiation temperature

PACC: 5255, 0560, 4440, 5270