

X 射线辐射在双孔柱腔靶中传输实验研究

江少恩 郑志坚 孙可煦 黄天暄 杨家敏 崔延莉 陈久森 郭 素 胡 昕 汤晓青

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2000 年 7 月 23 日收到, 2001 年 8 月 26 日收到修改稿)

在“星光 II”装置上,采用双孔柱腔靶研究辐射在空腔中轴向传输变化特性,提出“漏水管”辐射运输的简化模型,用来分析 X 射线在空腔中的传输的实验结果。分析结果表明,简化模型与实验结果基本相符。X 射线运输的结果是输运末端的 X 射线减弱,辐射持续的时间增大,等离子体弛豫时间增大。

关键词:双孔柱腔靶,辐射传输,“漏水管”模型

PACC:5250J,5225P,0560

1. 引 言

间接驱动惯性约束聚变(ICF)实验中,激光从圆柱形黑腔两端的注入口进入黑腔,激光在腔壁吸收,并被转换为软 X 射线。黑腔一般由高原子序数(如 Au)制成,能大量地产生 X 射线。X 射线在很快被腔壁吸收并再辐射 X 射线而重新进入腔内,形成腔内辐射场。X 射线与腔壁材料经过多次反复相互作用、交换能量,使得腔内辐射场与物质间渐渐趋于平衡。腔内辐射场的建立过程称之为辐射运输。通过辐射运输过程将 X 射线能量传递到腔内的内爆区,驱动氘氚靶球发生聚变反应。

X 射线辐射运输过程在间接驱动 ICF 中起着重要的作用,是 X 射线转换区与内爆区之间的桥梁,运输效率的高低直接影响辐射驱动内爆压缩的好坏。研究辐射运输特性,有助于研究间接驱动 ICF 有效内爆规律相关过程^[1-4]。

由于辐射运输物理过程极其复杂,为了对辐射特性作仔细的研究,应与其他物理过程分开,这要求采用适当的分解靶进行研究。

以往对辐射运输的研究将产生辐射运输的源靶和运输靶分开测量,比较的是不同发次间的源和运输变化^[5-7]。由于激光注入条件重复性难以保证,使得输入和输出脱节,所以不同发次的源靶与管靶的比较有可能引起较大的误差。本文有所改进,测量的是同一发次的源和运输情况。改进的方法就是在源区附近(运输始端)和输运末端开诊断孔,这样就可以对同一发次的源和运输进行测量,避免不同发次

之间的比较带来的误差问题。

2. 实验条件及靶型

实验在“星光 II”激光装置上进行,打靶条件为:激光波长为 $0.35\mu\text{m}$,激光能量约为 90J,脉冲宽度约为 700ps。靶室真空度约为 $7 \times 10^{-3}\text{Pa}$ 。

实验中采用双孔柱腔靶,见图 1。这种靶的柱腔直径为 $400\mu\text{m}$,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。在离注入孔直径为 $400\mu\text{m}$ 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 Au 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 射线辐射运输。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运输通道和缝口的堵塞。诊断孔的直径为 $\phi 150\mu\text{m}$,采用不同的运输长度,研究 X 射线能量沿不同运输距离的变化情况。运输腔长度 L 的具体尺寸见表 1。

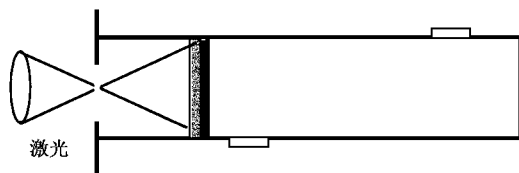


图 1 双孔柱腔靶

表 1 双孔柱腔靶运输腔长度 L

$L/\mu\text{m}$	600	800	1400

3. 实验布局

实验仪器布局见图 2. 实验用两台软 X 射线能谱仪 (Dante) 分别监测始、末端孔发射 X 射线谱时间特性. 两台透射光栅谱仪 (TG + CCD) 分别监测始、末端孔发射 X 射线谱更细致的结构. 一台软 X 射线分幅相机 (XFC) 及一台软 X 射线扫描相机 (XSC) 分别从两侧观测始、末端孔发射 X 射线的时、空特性. 两组平响应 X 射线二极管 (P-XRD) 分别监测始、末端孔发射 X 射线的角分布及其发射总量.

针孔相机 (PHC) 布置在与入射激光成 22.5° 夹角的方向上, 用来监测激光注入情况.

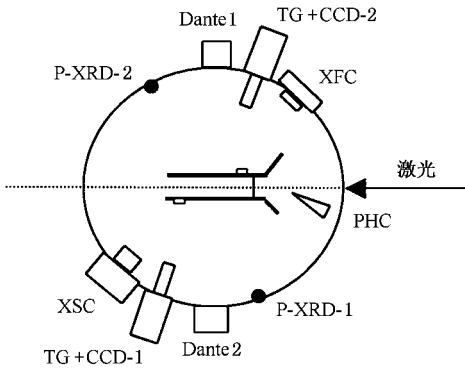


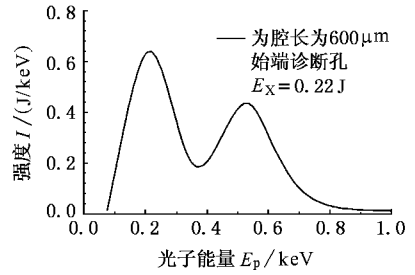
图 2 实验探测器布局示意图 Dante 为软 X 射线能谱仪 ;TG + CCD 为透射光栅谱仪配 X 射线 CCD ;XSC 为 X 射线条纹相机 ;XFC 为分幅相机 ;XRD 为 X 射线二极管

4. 实验结果与分析

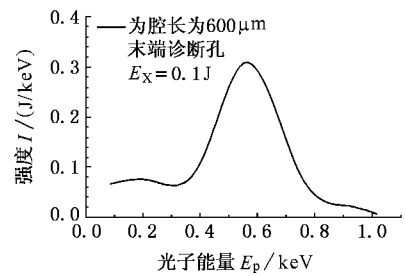
对 3 种长度分别 0.6、0.8、1.4mm 的腔靶得到的 X 射线谱见图 3 A 和 5. A 为始端诊断孔辐射的 X 射线谱, B 为末端诊断孔辐射的 X 射线谱. 可以看到 X 射线经过腔内传输, 谱型发生变化, D 带比 N 带衰减更多. 这是由于在腔内低能 X 射线被吸收更多的缘故. 图例中已给出 X 射线量的大小.

由上述的 3 种长度的末端诊断孔 X 射线量 E_{X2} 与始端诊断孔的 X 射线量 E_{X1} 的比值 $E_{21} = E_{X2} / E_{X1}$ 将此比值绘制在图 6 中 (见图 6 中的离散点). 为了分析 X 射线能量传输特性, 我们提出“漏水管”模型 (见图 7), 总辐射 I_X 由于腔壁泄漏和传输角度及距离而衰减. 图 7 中 l_α , l_w 和 l_g 分别表示输运自由程、泄漏自由程和几何自由程 (都以腔半径归一),

l_w 为由于辐射进入腔壁所引起的, l_g 与视角因子有关^[8].

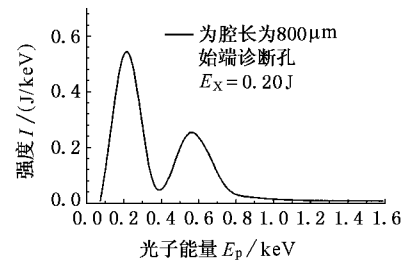


A

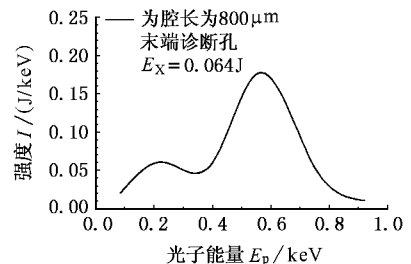


B

图 3 0.6mm 长度的柱腔靶始端和末端诊断孔的 X 射线谱

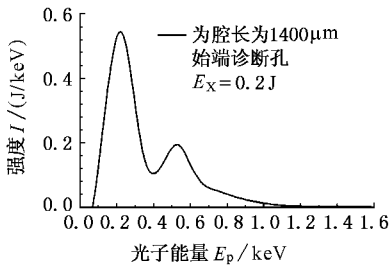


A

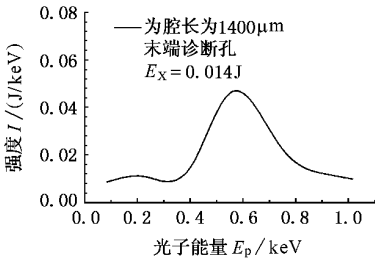


B

图 4 0.8mm 长度的柱腔靶始端和末端诊断孔的 X 射线谱



A



B

图5 1.4mm 长度的柱腔靶始端和末端诊断孔的 X 射线谱

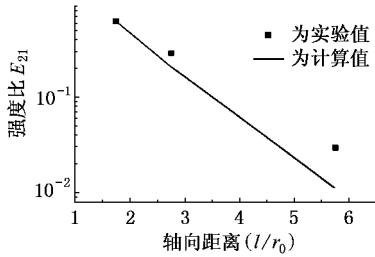


图6 辐射能量随传输距离的衰减变化

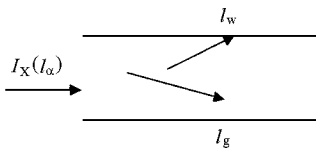


图7 漏水管模型

总的自由程即运输自由程 l_α 是几何自由程 l_g 及泄漏自由程 l_w 组合得到的,即

$$\frac{1}{l_\alpha} = \frac{1}{l_g} + \frac{1}{l_w} \quad (1)$$

将 $l_g = 3.83$ 和 $l_w = 1.353$ 代入(1)式得到 $l_\alpha \approx 1.0$. 将此结果绘制在图6的曲线中,可以看到,在距离较小时,理论值与实验值差别较小.需要说明的是,“漏

水管”模型中的泄漏自由程 l_w 只与腔壁材料有关,而几何自由程 l_g 与运输管的长度有关,但是在我们所研究的范围内, l_g 变化不大,所以 l_g 和 l_w 的取值是合理的^[7,8].作为比较的实验测量,图6中的3个实验点的辐射强度测量误差在30%左右,辐射强度绝对测量是很困难的,难以达到很高的精度.以前通过两发打靶之间输入量与输出量的比较,还要带来额外更大的误差,因为强激光运行时,不同打靶发次之间的激光能量和注入条件差异极大,所引起的误差很大.即使激光能量相同,但注入条件有可能极为不同,而激光注入条件难以监测,比如激光注入腔内焦斑的大小是不可能去测量的,不同的焦斑所得到的激光强度就不同,产生的 X 射线辐射强度就不同,所以不同发次之间的比较误差可能很大,而且这个误差难以定量给出.本实验中所采用双孔柱靶则是同一发次的比较,剔除了这一误差来源.

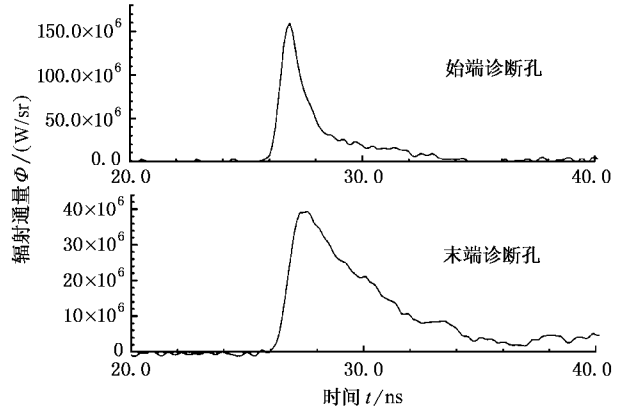


图8 平响应 XRD 的时间信号

由平响应 XRD 得到的时间信号见图8,图8中给出空腔长度为0.8mm的时间信号.可以看到,末端孔的峰值强度是始端孔的峰值强度的1/4左右;末端孔的脉宽(FWHM)约为2ns,而始端孔脉宽约1ns.始端孔由于离辐射源区很近,基本与辐射源相同.由图8可见,末端孔与始端孔相比 X 射线辐射持续的时间要长,且辐射脉冲峰值过后下降得更加缓慢,这是由于腔内等离子体冷却更慢,弛豫时间更长.

5. 结 语

通过上述的工作,得到的结果简单概括如下:采用3种长度分别0.6,0.8,1.4mm的双孔柱腔

靶, 测量 X 射线在不同长度的传输管道中的衰减变化. 提出“漏水管”的简化模型和与 X 射线能量传输有关的自由程的概念, 用来分析 X 射线能量传输的实验结果, 并与实验结果基本一致.

本文的实验内容是在制靶人员和“星光 II”装置运行人员共同配合下完成的, 作者感谢他们的辛勤劳动.

- | | |
|--|--|
| [1] Tsakiris G D <i>et al</i> 1992 <i>Phys. Fluids</i> B4 992 | [6] Cheng J X <i>et al</i> 2000 <i>Acta Phys. Sin.</i> 49 282 (in Chinese) 成金秀等 2000 物理学报 49 282] |
| [2] Stockl C <i>et al</i> 1993 <i>Phys. Rev. Lett.</i> 70 943 | [7] Jiang S E <i>et al</i> 2000 <i>Acta Phys. Sin.</i> 49 1303 (in Chinese) 江少恩等 2000 物理学报 49 1303] |
| [3] Stockl C <i>et al</i> 1991 <i>Laser and Particle Beams</i> 9 725 | [8] Jiang S E <i>et al</i> 2000 <i>Acta Phys. Sin.</i> 49 1507 (in Chinese) 江少恩等 2000 物理学报 49 1507] |
| [4] Rosen M 1996 <i>Phys. Plasma</i> 3 1083 | |
| [5] Jiang S E <i>et al</i> 2000 <i>Acta Phys. Sin.</i> 49 1101 (in Chinese) 江少恩等 2000 物理学报 49 1101] | |

Experimental investigation on X-ray radiation transport along cylindrical cavity target with double diagnostic holes

Jiang Shao-En Zheng Zhi-Jian Sun Ke-Xu Huang Tian-Xuan Yang Jia-Min

Cui Yan-Li Chen Jiu-Sen Guo Su Hu Xin Tang Xiao-Qing

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

(Received 23 July 2000 ; revised manuscript received 26 August 2001)

Abstract

The cylindrical cavity target with double diagnostic holes was used to investigate the properties of X-ray radiation transport along axis of the empty cavity. The simple radiation transport model of ‘leakage pipe’ was put forward and was used to analyze the experimental results of radiation transport in the empty cavity. The analysis showed that the simple model of radiation transport agreed basically with the experimental results. The measurements using soft X-ray spectrometers (dante) and X-ray streaked cameras indicated that at the end of the transportation, the X-ray radiation is attenuated, radiation time and relaxation time of the plasma were much longer than those at the entrance.

Keywords : cylindrical cavity target with double diagnostic holes, radiation transport, model of ‘leakage pipe’

PACC : 5250J, 5225P, 0560