

X 射线辐射输运分解实验研究

成金秀 缪文勇 孙可熙 王红斌 杨家敏 曹磊峰 温天舒
陈正林 杨存榜 江少恩 崔延莉 汤小青 于艳宁 陈久森

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 高温高密度等离子体物理实验室, 成都 610003)

(1999 年 5 月 2 日收到; 1999 年 6 月 28 日收到修改稿)

在“星光 II”激光装置上进行了 X 射线辐射输运分解实验研究. 实验中利用高时空分辨的 MCP 选通 X 射线皮秒分幅相机和软 X 射线条纹相机从缝口观测腔内壁 X 射线辐射时空分布, 得到 X 射线在腔中的输运速率、X 射线持续发射时间和轴向强度衰减量, 利用 X 射线 CCD 针孔透射光栅谱仪观测到腔内 X 射线辐射光谱随空间位置的变化, 得到 X 射线在输运过程中被多次吸收和发射后谱的变化特征, 用 X 射线二极管和亚千 X 射线能谱仪分别得到源和输运末端 X 射线辐射总量和辐射温度. 介绍了实验中采用的诊断技术和实验方法, 并给出了获得的典型结果.

PACC: 5250J; 5225P; 5225

1 引 言

X 射线辐射输运是辐射驱动惯性约束聚变 (ICF) 的重要过程. 在源区产生的 X 射线经通道输运进入内爆区, 并形成高温、干净、均匀的辐射场驱动压缩氘氚靶丸, 实现高度球对称内爆. 由于 X 射线在输运过程中与腔壁物质发生作用, 会产生各种复杂的物理过程^[1-7], 辐射与物质特性随时间和空间变化而变化. 在输运通道内, 辐射由非平衡向平衡的过渡是通过输射与壁物质进行能量交换实现的, 其交换速率的大小确定辐射是否处于平衡. 热辐射沉积在高 Z 材料的通道壁上, 会形成相当稠密的等离子体, 等离子体膨胀喷射使输运通道变窄, 甚至阻塞, 影响 X 射线的有效输运. 高 Z 材料的通道壁对 X 射线的吸收和再发射会损失部分能量, 降低 X 射线输运效率.

由于 X 射线辐射输运物理过程十分复杂, 在实验研究上需进行适当分解. 用源靶观察 X 射线输运的初始条件, 包括输运能流、辐射温度、等离子体运动状态以及辐射光谱时空特性. 并用适当构型的柱腔靶和异型靶产生 X 射线输运的低温条件, 观测 X 射线在输运过程中强度随时间和空间的变化规律以及等离子体运动对输运造成的影响, 研究 X 射线在输运过程中产生的各种物理机制以及输运效率与辐射特性之间的关系, 并在实验中建立相应的诊断技

术和实验方法.

本工作分别采用长柱缝靶、源靶和输运靶进行了 X 射线辐射输运特性分解实验研究. 利用长柱缝靶主要研究 X 射线在输运腔中的再辐射特性, 通常腔壁不同位置具有不同的温度和不同的谱特征, 而温度和谱特征又与辐射时间紧密相关. 采用柱腔开缝的方法, 利用时空能谱组合诊断技术观测柱腔壁辐射细致结构, 可以得到辐射光谱改变过程, 温度空间梯度以及 X 射线轴向强度时空分布. 利用源靶和输运靶获取源 X 射线辐射总量和 X 射线输运量, 研究 X 射线的输运效果. 实验中利用高时空分辨的 MCP 选通 X 射线皮秒分幅相机^[8] (XFC) 和软 X 射线条纹相机 (XSC) 从缝口观测腔内壁 X 射线辐射时空分布, X 射线 CCD 针孔透射光栅谱仪观测腔内 X 射线辐射光谱随空间位置的变化, X 射线二极管 (XRD) 和亚千 X 射线能谱仪 (Dante 谱仪) 分别获取源、缝口和输运末端 X 射线辐射总量和辐射温度, 获得了较好的实验结果.

2 实验条件和靶型

采用 3 倍频激光打靶, 入射激光能量 70—100 J, 脉宽 600—800 ps, 激光 0° 入射, 聚焦注入, 靶室真空度好于 7×10^{-3} Pa.

靶结构见图 1. (a) 为双缝结构, 双缝的缝中心偏离水平线 $\sim 20^\circ$, 以确保对称安装的探测器不能观

测到对面缝口发射的 X 射线. 柱腔直径为 $400\ \mu\text{m}$, 长度为 $1.5\ \text{mm}$. 采用 $300\ \mu\text{m}$ 直径的大注入孔提高激光能量注入, 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, 该厚度大于 $0.35\ \mu\text{m}$ 激光对 Au 箔的烧穿深度, 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 膜抑制高 Z 等离子体膨胀喷射造成的输运通道和缝口的堵塞. 输运腔长 $1.2\ \text{mm}$, 柱腔上的缝长度为 $1\ \text{mm}$, 宽度为 $0.1\ \text{mm}$, XFC 和 XSC 以及 X 射线 CCD 针孔透射光栅谱仪等诊断设备通过缝口获取腔内 X 射线辐射信息, 寻求 X 射线辐射时间、空间和能谱间的相互关系. (b) 是 (a) 去掉带缝输运腔的源靶, (c) 是 (a) 去掉双缝后的输运靶. 用 XRD 分别观测源和输运靶 X 射线辐射角分布, 给出 X 射线辐射总量. 用 Dante 谱仪分别观测源和输运终端 X 射线辐射能谱, 并由此推算 X 射线辐射温度.

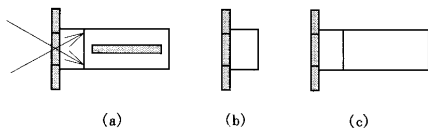


图 1 柱腔输运靶结构示意图

3 实验布局

实验布局见图 2, 靶被置于靶室中心, 缝位于南北方向. XFC 被安置在正北 $\phi 200\ \text{mm}$ 的水平法兰孔上, 相机空间分辨 $15\ \mu\text{m}$, 时间分辨 $60\ \text{ps}$, 谱响应 $0.1\text{--}10\ \text{keV}$, 画幅数 12 幅, 输出图像用 2033×2044 像素的高分辨可见光 CCD 记录. 该相机用来观测缝口 X 射线辐射强度随时间和二维空间的变化特征.

XSC 被安置在正南 $\phi 200\ \text{mm}$ 的水平法兰孔上, 相机时间分辨 $6\ \text{ps}$, 空间分辨 $25\ \mu\text{m}$, 谱响应 $0.1\text{--}10\ \text{keV}$, 阴极强度均匀性好于 $\pm 7\%$. 该相机用来获取缝口 X 射线辐射时空分布.

X 射线 CCD 透射光栅谱仪与入射激光束夹角 112.5° , 用来获取缝口 X 射线辐射光谱空间分布. 谱仪中使用的光栅为无支撑 Au 透射光栅, 光栅线为 $1030\ \text{线/mm}$, Au 线厚度 $0.5\ \mu\text{m}$, 线空比 $\sim 1:1$, 记录系统为美国普林斯顿生产的 X 射线 CCD, 有效像素

为 1024×960 , 有效光敏面为 $24.6\ \text{mm} \times 23.1\ \text{mm}$. 该谱仪空间分辨 $20\ \mu\text{m}$, 光谱分辨 $0.2\ \text{nm}$, 具有较高的灵敏度, 特别适合对低能弱光强的辐射光谱进行成像测量.

XRD 由 Au 阴极 X 射线二极管加复合滤片构成, 对能量分布在 $0.1\text{--}1.5\ \text{keV}$ 范围内的软 X 射线具有平响应特性, 其灵敏度 $\sim 2.8 \times 10^{-5}\ \text{A/W}$, 时间响应 $< 100\ \text{ps}$. 该探测器为分离探头, 主要布置在靶室内的支撑架上, 用来获取缝口、源和输运靶末端 X 射线辐射角分布和辐射总量.

Dante 谱仪由滤片-X 射线二极管阵列组成, 各探测道系统时间分辨 $\leq 0.4\ \text{ns}$, 输出信号用数台频带宽为 $1000\ \text{MHz}$ 快写速示波器记录. 该谱仪与入射激光束夹角为 135° , 测量源和输运靶末端 X 射线辐射谱.

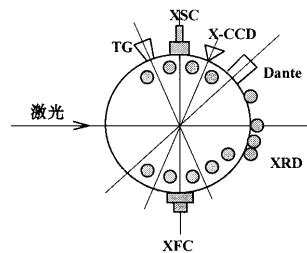


图 2 探测器布局示意图

4 实验结果

4.1 腔壁 X 射线辐射时空特性

用 XFC 获得的双缝靶腔壁 X 射线辐射 12 幅时空分辨像见图 3(a). 同一微带相邻两幅像之间的时间间隔是 $57\ \text{ps}$, 各微带间的时间间隔分别为 $0, 345, 1070, 1950\ \text{ps}$, 总的测量时间为 $2.15\ \text{ns}$. (b) 为不同时刻腔壁 X 射线轴向空间分布. 从图 (a) 和 (b) 中可观测到在第一条微带上 ($0\text{--}205\ \text{ps}$), X 射线轴向强度随时间的增加明显的增强, 而辐射主要集中在缝对应的前半部腔壁. 在第二和第三条微带上 ($345\text{--}1275\ \text{ps}$), 后半部腔壁辐射强度逐渐增强, 此时该区域已被 X 射线加热并产生再辐射. 在第四条微带上 ($1950\text{--}2155\ \text{ps}$), 腔壁已开始冷却, 辐射强度已明显减弱, 而减弱程度以缝的前后两端对应的腔壁更明显. 从图中还可观测到 X 射线在输运过程中强度衰减严重, 在激光峰值时刻, 轴向强度衰减近

50%—70%.

图 4(a)是利用 XSC 获得的腔壁 X 射线辐射时空分辨像 (b)是时间分别为 200 ps 和 350 ps 时缝口 X 射线辐射空间分布,当 $t = 200$ ps 时,末端腔壁还未完全被运输的 X 射线加热,再辐射的 X 射线强度太弱.当 $t = 350$ ps 时,末端腔壁逐渐被运输的 X 射线加热,从缝的始端到末端强度衰减 ~70% 和分

幅相机获得的结果基本一致.(c)是在缝长分别为 $190 \mu\text{m}$ 和 $460 \mu\text{m}$ 位置上 X 射线发射的时间分布,从图中可见,在缝的中部, X 射线发射持续时间最长,达 3.25 ns,而在缝的始端和终端 X 射线发射持续时间相对较短.另外从(a)中利用图像时空分布的斜率得到 X 射线在腔中的运输速度为 $2.4 \times 10^8 \sim 2.6 \times 10^8 \text{ cm/s}$.

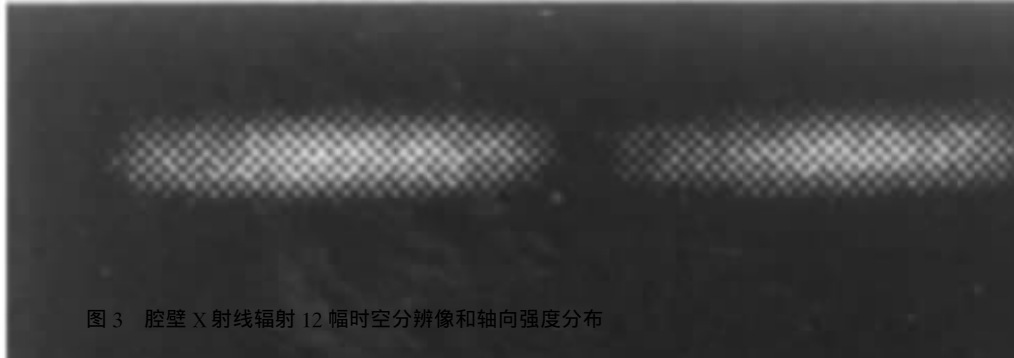


图 3 腔壁 X 射线辐射 12 幅时空分辨像和轴向强度分布

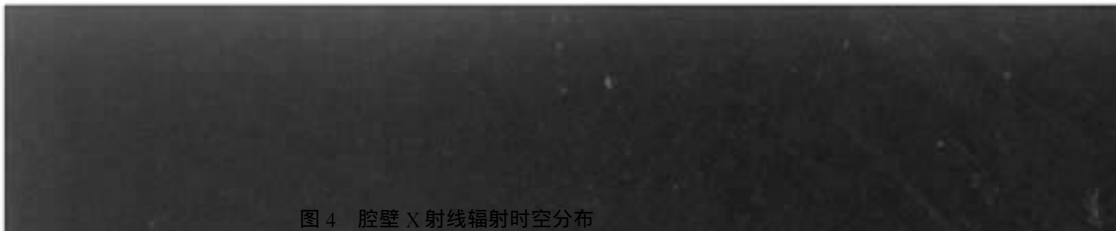


图 4 腔壁 X 射线辐射时空分布

4.2 腔壁辐射光谱空间特性

用 X 射线 CCD 配透射光栅谱仪获得缝口 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.从图中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.

(b)是在缝的不同空间位置上 X 射线辐射光谱分布(测量谱)在 $L = 25 \mu\text{m}$ 附近(缝的始端 $L = 0$, $Z = 100 \mu\text{m}$),发射光谱带状结构明显,发射较强的峰值波长在 1.4 nm 附近,谱特征反应出一定的非平衡特性.随着缝长的增加, X 射线辐射的高能成分逐渐减少,当 $L \geq 765 \mu\text{m}$ 时,高能 X 射线辐射强度已很弱,辐射的 X 射线通过腔壁物质的吸收和再发射

过程,能谱被软化,主要能量集中在大于 4 nm 的波长范围.在该区域,辐射能量转化为物质能量,辐射的 X 射线趋于与介质材料无关的温度辐射,辐射的能谱分布趋于普朗克分布.(c)是利用迭代法将获得的测量谱(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,其解谱公式为

$$I_S(\lambda) = \frac{I_S^0(y)}{gc\eta_{QE}(\lambda)\eta_i(\lambda)}, \quad \lambda < 2\lambda_c, \quad (1)$$

$$I_S(\lambda) = \frac{I_S^0(y)}{gc\eta_{QE}(\lambda)\eta_i(\lambda)} - \sum_{m=2}^3 I_S\left(\frac{\lambda}{m}\right) \eta_{QE}\left(\frac{\lambda}{m}\right) \frac{\eta_m(\lambda)}{m\eta_i(\lambda)}, \quad \lambda > 2\lambda_c, \quad (2)$$

式中 $I_S(\lambda)$ 是解谱后的谱强度分布, $I_S^0(y_i)$ 为 CCD 上 y_i 位置处的信号计数, g 为与 CCD 性能有关的

常数, η_{QE} 为 CCD 量子效率, $\eta_m(\lambda)$ 为透射光栅衍射效率. m 为光栅衍射级次, 而 λ_c 为谱仪截止波长. (d) 是利用解谱结果计算的腔内辐射温度空间分布. 在温度计算中, 将不同空间位置上的辐射强度按能

量积分, 得到不同空间位置上的辐射能流. 然后利用 Stefan-Boltzman 公式 $S = \sigma T_R^4$ 得到不同空间位置上的辐射温度分布, S 为辐射能流, σ 为 Boltzman 常数, T_R 为等效温度. 图中“•”为实验数据点, 细实线

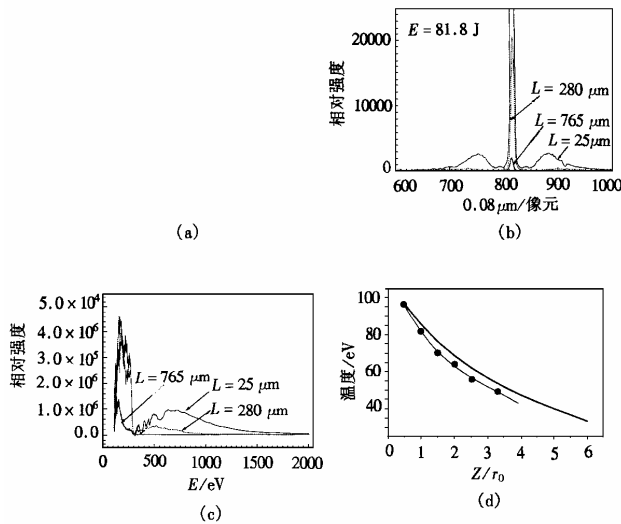


图 5 缝口 X 射线辐射光谱和温度空间分布

为拟合曲线, 粗实线根据文献 [3] 计算的理论结果.

4.3 X 射线辐射角分布和辐射总量

用 XRD 观测到源靶和运输靶 X 射线辐射角分布见图 6 (a) 是源靶 X 射线辐射角分布, θ 为 XRD 与靶面法线夹角; “•”为实验数据点, 直线为数据拟合线. 从图中可见, 源靶 X 射线辐射近似为 $\cos\theta$ 分

布. 将实验数据进行线性积分, 得到源靶 X 射线辐射总量为 13.8—16.1 J. 加 1.2 mm 长度的运输管道后, 受管道的约束, 在大角度 X 射线辐射强度明显减小, 而在小角度则明显增强 (见图 6 (b)), 其 X 射线辐射角分布明显偏离 $\cos\theta$ 分布, 将数据进行曲线拟合并积分, 得到运输靶辐射总量为 0.8—1 J, 近似为源靶辐射通量的 1/20.

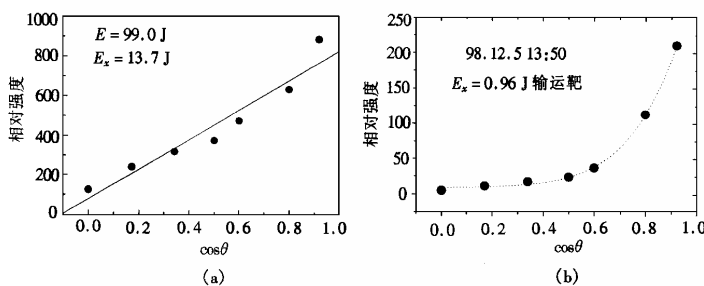
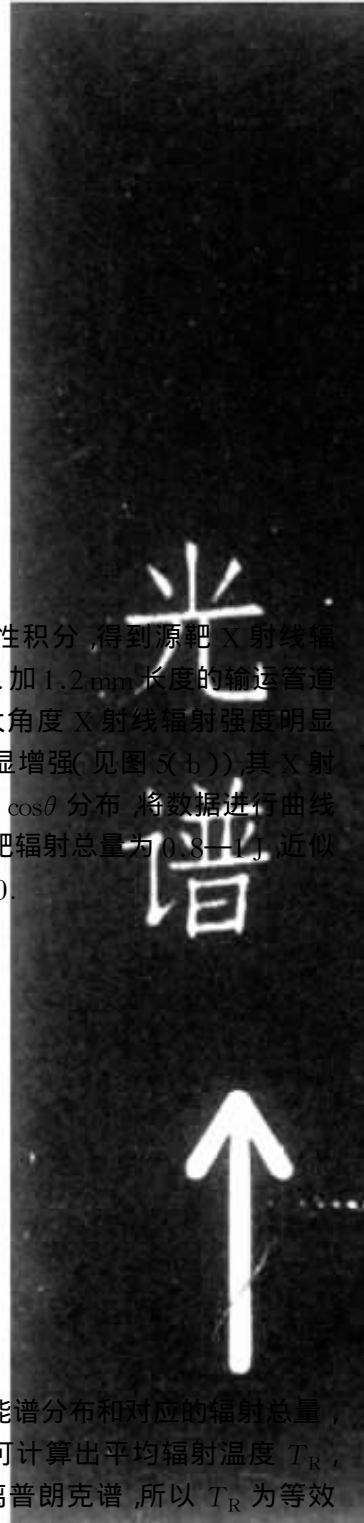


图 6 源靶和运输靶 X 射线辐射角分布

4.4 X 射线辐射温度

图 7 是用亚千 X 射线能谱仪获得的源靶 (a) 和

运输靶 (b) X 射线辐射能谱分布和对应的辐射总量, 由测量的 X 射线总量可计算出平均辐射温度 T_R , 由于 X 射线谱可能偏离普朗克谱, 所以 T_R 为等效



温度. 由源的 X 射线辐射总量 15.1 J 计算出源的辐射能流为 2.0×10^{13} W/cm², 由 $S = \sigma T_R^4$ 得到源的辐射温度为 118 eV. 对运输靶, 由于谱仪与靶轴线呈 45° 夹角, 谱仪只能观测到运输管末端 1/3 长度范围内的腔壁辐射, 实验得到该区域的 X 射线辐射总

量为 0.2 J, 对应的 X 射线辐射能流为 2.7×10^{11} W/cm², 由此得到运输管末端辐射温度为 37 eV. 比较源靶与运输靶的辐射温度对 X 射线运输研究很有意义, 由此可以得出 X 射线运输效率.

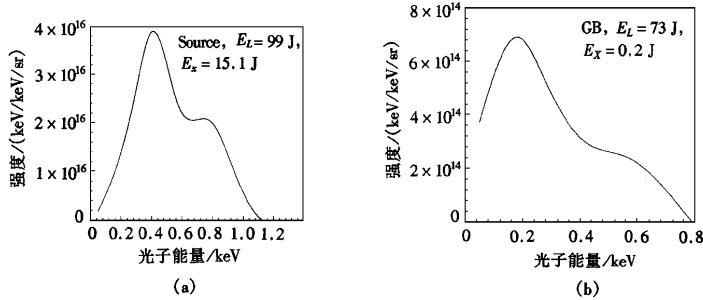


图 7 X 射线辐射能谱分布

5 分析讨论

本工作将实验进行了适当的分解, 缝靶采用双缝结构, 垂直入射方式, 简化了数据分析难度, 并提供了多种诊断设备同时观测运输通道 X 射线辐射细致结构的机会. XFC 和 XSC 都成功地获得了腔壁 X 射线辐射时空图像, 通过图像得到了 X 射线辐射持续时间、运输速率和强度衰减量, 获得的数据能相互自洽. 同时还观测到由于缝口堵塞所造成的缝前端 X 射线辐射强度随时间的增加而减弱的现象. 由于缝前端离源较近, 来自源的 X 射线辐射较强, 这部分 X 射线加热缝口并产生等离子体, 等离子体的膨胀和喷射, 使部分缝口对 X 射线不透明, 形成部分缝口堵塞, 此时 XFC 和 XSC 将不能观测到腔内壁 X 射线辐射, 因此缝口堵塞对观测腔内 X 射线辐射特性会造成一定影响. 另外, 由于 X 射线沿柱腔向后运输, 腔内能量进行再分配, 在分配过程中 X 射线经腔壁不断的吸收和再发射, 能量不断损失, 轴向强度衰减十分严重, XFC, XSC, XRD 和 Dante 谱仪的测量结果是一致的.

在实验中 Dante 谱仪分别测量了缝靶和运输靶末端 X 射线辐射能量和辐射温度, 在确保不能观测到缝口辐射的情况下对两种靶 X 射线辐射能量进行了比较, 发现缝靶 X 射线辐射能量大于运输靶辐射能量, 我们认为这一现象是运输通道阻塞造成的, 由于 X 射线加热腔壁后产生的等离子体的向心膨

胀和会聚使运输通道变窄甚至堵塞, 影响 X 射线的有效运输. 对于缝靶, 由于缝口 X 射线能量泄漏, 在腔内壁不能形成对称分布的膨胀等离子体, 因此缝口的存在可能会减缓腔内等离子体的会聚作用.

X 射线辐射运输、辐射烧蚀特性、高温物质的辐射不透明度研究等都需要精确测量 X 射线辐射光谱. 基于衍射现象的色散元件(晶体、多层膜、光栅等)和记录介质构成的高分辨光谱仪, 所测得的光谱已是畸变后的辐射谱, 必须用各探测系统相应的解谱程序来修正测试系统对原始谱的畸变. 我们利用 X 射线 CCD 配透射光栅谱仪观测腔内壁 X 射线辐射光谱时空特性, 由于 CCD 是线性元件, 解谱相对于胶片更容易. 本工作采用迭代法对测量谱进行解谱, 由于迭代法解谱是由短波长到长波长逐步去高价衍射从而求得整个软 X 射线谱, 短波长的误差对长波长结果产生影响, 并对长波长光谱解谱造成较大误差, 因此需发展更新的解谱方法来提高解谱精度.

6 结 论

1. 当入射激光能量 70—100 J, 脉宽 600—800 ps, 缝长 1 mm, 腔直径 400 μm 时, 观测到 X 射线在腔中的运输速度是 2.4×10^8 — 2.6×10^8 cm/s, X 射线发射持续时间 ~3.25 ns.

2. 源靶 X 射线辐射角分布接近 $\cos\theta$ 分布, 而运输靶 X 射线辐射角分布明显偏离 $\cos\theta$ 分布,

XRD 和 Dante 谱仪测量的 X 射线辐射总量符合较好.

3. 在离源较近的输运管内 ,X 射线辐射光谱带状结构明显 ,显示出一定的非平衡特性 ,经过腔壁不断地吸收和再发射之后 ,谱被改造 ,在输运管末端 ,辐射光谱近似为普朗克谱.

4. X 射线轴向强度沿输运方向衰减严重 ,其强度空间分布近似满足指数衰减规律.

5. 实验中观测到 X 射线加热缝口产生的等离子体形成缝口部分阻塞 ,影响腔壁 X 射线辐射特性的精确测量 ,同时观测到 X 射线加热腔壁产生的高 Z 等离子体的膨胀和会聚使输运通道变窄而影响 X 射线的有效输运现象 ,因此在缝口或腔壁加低 Z 介质抑制等离子体膨胀 ,可减少缝口或输运腔堵塞程度.

本工作得到郑志坚、温树槐、唐道源、丁耀南等研究员和丁永坤副研究员的关心和支持.星光 II 激光装置运行人员和制靶组成员的大力协作 ,在此一并致射.

- [1] C. Stockl ,G. D. Tsakiris ,*Laser and Particle Beams* ,**9**(1991) , 725.
- [2] H. Nishimura ,H. Takabe ,K. Kondo ,*Phys. Rev.* ,**A43**(1991) , 3073.
- [3] G. D. Tsakiris *et al.* ,*Phys. Fluids* ,**B4**(1992) ,992.
- [4] H. Nishimura ,H. Shiraga ,*Laser and Particle Beams* ,**11** (1993) 89.
- [5] Richard W. Lee ,*Scientific Applications for High-Energy Lasers* (1994) UCRL-ID-116335 ,12.
- [6] C. Stockl ,G. D. Tsakiris ,*Phys. Rev. Lett.* ,**70**(1993) ,943.
- [7] J. Massen ,R. Sigel *et al.* ,*Phys. Rev.* ,**A42**(1990) ,6188.
- [8] Cheng Jinxiu ,Yang Cunbang *et al.* ,*Chinese Science Bulletin* ,**42**(1997) ,1215.

DISINTEGRATE EXPERIMENT OF X-RAY RADIATION TRANSPORTATION

CHENG JIN-XIU MIAO WEN-YONG SHUN KE-XI WANG HONG-BIN YANG JIA-MIN
CAO LEI-FENG WEN TIAN-SHU CHEN ZHENG-LIN YANG CUN-BANG JIANG SHAO-EN
CUI YAN-LI TANG XIAO-QING YU YAN-NING CHEN JIU-SEN

(*Laboratory for Laser Fusion , Institute of Nuclear Physics and Chemistry China Academy of Engineering Physics ,Chengdu 610003*)

(Received 2 May 1999 ; revised manuscript received 28 June 1999)

ABSTRACT

On the Xingguang-II facility ,X-ray transport process in a cavity target was simulated in a long cylindrical cavity with slits. High temporally and spatially resolved microchannel plate (MCP) gated X-ray picosecond frame camera and soft X-ray streak camera were used to investigate the temporal and spatial distribution of the soft X-rays emitted from the cavity wall through the slit. X-ray transport velocity , X-ray emission time and the amount of intensity decay were obtained. X-ray CCD pinhole transmission grating spectrometer was used to investigate the spectrum change of the emitted X-rays versus its location. The variation characteristic of the spectrum of X-rays absorbed and emitted again and again in transport was obtained. X-ray diodes and Dante spectrometer were used to measure X-ray flux and radiation temperature in the slit , the source and the transport end. The typical results in the experiment were given. About the results , simple and essential analysis and discussions were made.

PACC : 5250J ; 5225P ; 5225