

Z-pinch 一维时空分辨 x 射线辐射功率测量系统^{*}

徐荣昆 李正宏 郭 存 杨建伦 李林波 宋凤军 宁佳敏 夏广新 许泽平

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2002 年 6 月 14 日收到 2002 年 10 月 20 日收到修改稿)

采用狭缝、红光闪烁体、光纤阵列、条纹相机、像增强器等元件组成 x 射线辐射功率时空分辨测量系统, 该系统具有对 x 射线能量响应平坦, 可有效屏蔽本底光干扰的优点, 在喷气 Z-pinch 实验中成功获得内爆等离子体 x 射线辐射的轴向分布图像. 文中对系统结构、参数和使用情况进行了介绍, 对测量结果进行了讨论.

关键词: Z-pinch, x 射线, 时空分辨, 图像

PACC: 5270L, 0762, 3220, 4285F

1. 引言

Z-pinch 过程包括早期等离子体产生、等离子体融合、磁驱动轴向内爆、等离子体聚心热化和等离子体 x 射线辐射阶段^[1-3]. 类似于流体力学瑞利-泰勒($R-T$)不稳定, 即轻密度流体支撑重密度流体加速时边界扰动会导致不稳定性发展, 在 Z-pinch 情况, 磁场驱动等离子体时, 等离子体产生过程形成的不均匀性也获得体膨胀消散等非线性增长^[4], 进一步破坏等离子体鞘层均匀性, 降低 x 射线辐射峰值功率. 不稳定性的存在给理论模拟 Z-pinch 过程带来困难, 有关 x 射线辐射的数值模拟目前只能依据实验结果来进行修正, 直至理论模拟结果与实验结果相符合, 但不同的实验又需要重复相同的过程. 鉴于此, 实验对存在上述不稳定性的磁驱动压缩过程和 x 射线辐射时空分辨图像进行的诊断就尤为必要. 据报道, 美国 Sandia 实验室已经建立了相关测量设备对 Z-pinch 过程不稳定性进行研究^[5], 实验获得了一批等离子体流动和 x 射线辐射时空分辨图像数据, 这些结果已经为理解 Z-pinch 物理过程起到了积极作用.

2. 测量系统

对时空分辨 x 射线辐射功率测量系统设计要求

是: 1) 必须具备 x 射线平坦能量响应; 2) x 射线转换材料发光光谱必须与传输光纤以及条纹相机阴极光谱响应相匹配; 3) 瞬态时间响应为纳秒级; 4) 线性测量范围满足要求; 5) 具备抗强电磁干扰能力. 为此, 我们以狭缝、 x 射线/红光转换体、光纤面板、光纤传输线、可见光条纹相机、像增强器和 CCD(或胶片)等元件组成了该系统(图 1). 装置中狭缝方向垂直于 Z 轴设置, 则探测等离子体 Z 轴方向的一维时空分辨 x 射线辐射功率图像, 而狭缝方向平行于 Z 轴设置, 则探测等离子体径向一维时空分辨 x 射线辐射功率图像. 狭缝缝隙宽度、物距、像距和像增强器增益等参数则根据要求进行调节.

3. 设计参数

3.1. 闪烁体

Z-pinch 等离子体温度除随时间变化外, 不稳定性的存在也会导致等离子体温度空间分布的不均匀, 由于 x 射线辐射能谱与等离子体温度密切相关, 所以等离子体辐射的 x 射线能谱在时间和空间上都有变化, 对不同温度的等离子体 x 射线辐射功率进行相同效率的测量, 就要求测量系统在感兴趣的 x 射线能量范围内有平坦的能量响应曲线. 鉴于此, 利用北京同步辐射装置软 x 射线源对不同闪烁体的 x 射线能谱响应(图 2)进行了标定.

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10035030)资助的课题.

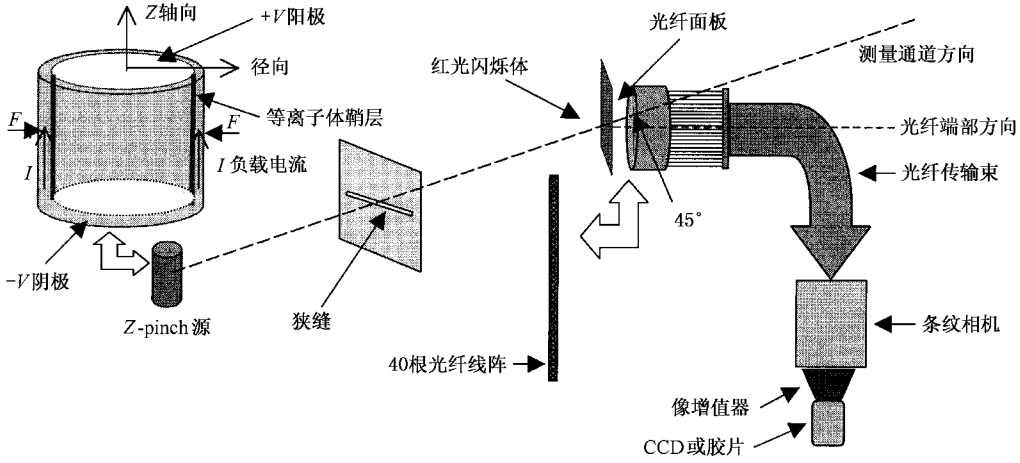


图1 一维(Z 轴向)时空分辨 x 射线辐射功率测量系统示意图

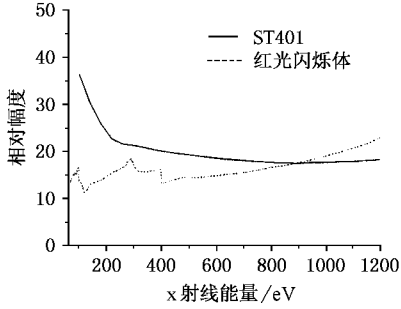


图2 使用同步辐射装置软 x 射线对闪烁体能量响应的标定结果

图2中ST401和红光闪烁体发光效率能量响应曲线是在相同的实验条件下获得的,测量中闪烁体发光由光电闪烁探测器转换成电信号记录,x射线注量率由标准硅光二极管监测.结果显示,与ST401闪烁体相比,红光闪烁体在100eV—1200eV能量范围内更具有良好的平坦能量响应曲线.由于该闪烁体发光波长在红光波段,比较适合于光纤传输,且脉冲时间响应(3.5ns)也能满足Z-pinch测量要求,因此它是比较理想的x射线转换材料.

3.2. 本底光屏蔽

Z-pinch过程既产生x射线辐射又伴随红外至紫外波段的本底光辐射,本底光辐射主要来自于等离子体周围低温发光物质,由于它可以直接穿过闪烁体而被光纤接收,因此危害极大.已有的对本底光的屏蔽方法一般是在闪烁体与源区之间加本底光过滤片,但这种方法会影响测量系统能量响应性能,以常用的0.1μm厚度的Al过滤片为例,计算表明,Al

材料L吸收边能量为117eV,对117eV至400eV的x射线,0.1μm厚度的Al对x射线有明显的吸收,最低穿透率仅为5%,过滤片的存在降低了测量系统的能量响应平坦性.

为不降低系统能量响应平坦特性,我们不采用传统的加滤片屏蔽方法,而是利用光纤具有有限接收角特性对本底光进行屏蔽.设光纤芯折射率为 n_1 ,光纤反射层折射率为 n_2 ($n_1 > n_2$),红光闪烁体折射率为 n_0 ,则光纤对红光闪烁体所发射的光最大接收角 α 满足^[6]

$$\sin \alpha = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} . \tag{1}$$

显然,只要本底光对光纤的入射角大于 α ,可见光就不能被光纤传输.实际装置中,设计光纤轴向与本底光传输方向夹角为45°,远大于 α ,因此,系统可以实现对本底光的有效屏蔽.

3.3. 空间分辨率

影响系统空间分辨的因素分别是几何光斑尺度、光纤芯尺度、x射线衍射和闪烁体厚度.

设装置中狭缝宽度为 w ,放大率为 M , λ 为x射线波长, L 是狭缝距闪烁体的距离, g 为闪烁体厚度, α 是光纤最大接收角,则几何光斑尺度、x射线衍射、闪烁体厚度引入的空间分辨 a, b, c 分别可由

$$a = u(M + 1)M , \tag{2}$$

$$b = \lambda L / w , \tag{3}$$

$$c = 2g \sin \alpha \tag{4}$$

计算.

又设光纤芯直径为 d ,那么系统的总空间分辨 f

可近似为

$$f = \sqrt{a^2 + b^2 + (c + d)^2}. \tag{5}$$

分析表明在 keV 的 x 射线测量能量范围内,依据系统设置参数(L 值小于 100cm, w 值范围 50—100 μm), b 值小于 12.4 μm , 因此 b 项的贡献可忽略. 对系统空间分辨的贡献主要来自 a 和 c 项, 使用中可以调整系统参数设置, 改变 a 和 c 值, 使系统空间分辨满足要求.

4. 实 验

实验在西北核技术研究所‘强光一号’装置上进行,使用时空分辨 x 射线功率测量系统对喷气 Z-pinch 等离子体 Z 轴方向 x 射线辐射功率时空分布进行了测量. 实验中系统设置参数为: 物距 99cm, 像距 25cm, 狭缝宽 100 μm , 闪烁体厚度 100 μm , 光纤阵列长度 5mm(由 40 根直径为 125 μm , 芯径为 50 μm 的光纤组成), 对应总 Z-pinch 源区测量长度约 2cm. 测量中, 条纹相机放置在全电磁屏蔽记录间, 用 30m 等长度光纤连接闪烁体与条纹相机.

为验证时空分辨 x 射线辐射功率测量系统可靠性, 实验中还使用了光电闪烁探测器对本底光进行监测. 监测时, 探测器前端放置对本底光透明, 对 x 射线吸收的透明塑料膜, 探测器输出的电流信号由 Tek 684C 数字化示波器记录.

图 3 是(02039 炮次, 喷气外径 18mm, 喷气线质量 29 $\mu\text{g}/\text{cm}$, 负载峰值电流 1.35MA) 时空分辨 x 射线辐射功率原始胶片记录结果, 图 4 是对胶片黑密度判读得到的数据, 图 5 是对胶片黑密度空间项积分获得的 x 射线辐射功率数据, 图 6 是(02039 炮次) 可见光监测结果.

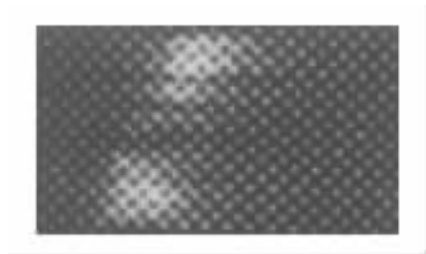


图 3 时空分辨 x 射线辐射功率条纹像

讨论 1) 图 3, 图 4 显示, 时空分辨 x 射线辐射功率测量装置成功地测到了喷气 Z-pinch 等离子体 x 射线辐射热区图像, 图像具有空间分布不连续, 发光时间不相同的特点, 理论分析表明, 空间分布不连续

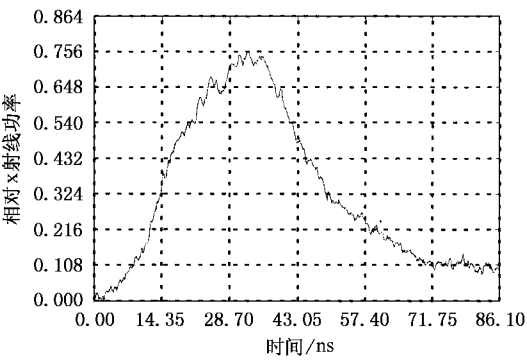


图 4 对图 3 黑密度处理的时空分辨光辐射功率

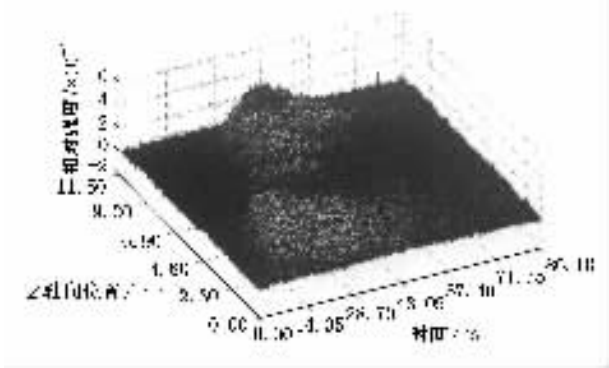


图 5 对图 4 空间项进行积分获得的 x 射线辐射功率

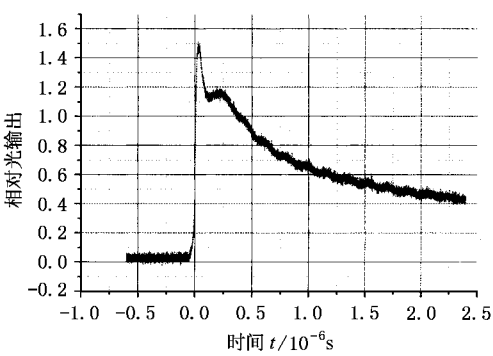


图 6 可见光发光特性

主要由磁流体动力学不稳定性产生, 而发光时间不相同则与喷气半径和体密度分布在 Z 轴向位置的差异密切相关, 实验所指示的不稳定性对 x 射线辐射功率的影响为理论模拟 Z-pinch 过程提供了宝贵的证据. 2) 图 5, 图 6 显示, 对时空分辨 x 射线辐射功率空间项进行积分获得的 x 射线辐射功率时间特性曲线前沿上升时间为 20ns, 峰值半宽度为 32ns, 而本底光发光特性前沿上升时间为 50ns, 峰值半宽度大于 700ns, 两者差别表明: 时空分辨光辐射功率测量未受到来自本底的干扰, 装置设计中采用的本底光屏蔽方法行之有效, 在不损害系统 x 射线能量响应

平坦性前提下实现了对本底光的有效屏蔽. 3) x 射线时空分辨功率测量过程涉及多次光/电和电/光转换, 环节的众多给研究系统的 x 射线探测灵敏度带来了困难, 喷气 Z-pinch 实验给标定系统 x 射线探测灵敏度带来了可能, 由于类似于图 5 的空间积分 x 射线辐射功率可以用经标定的“红光闪烁体 + 光电闪烁探测器”测量仪获得, 所以将两者进行比对即可获得 x 射线时空分辨功率测量系统的探测灵敏度.

5. 结 论

新研制了可对 Z-pinch 等离子体时空分辨 x 射

线辐射功率进行测量的探测系统, 该系统可对等离子体内爆过程和不稳定性发展进行诊断. 系统设计中将光纤光部轴向与本底光传输方向的夹角设计成 45° , 有效地消除了有害的本底光干扰, 所选用的红光闪烁体具有 x 射线能量响应平坦, 发光光谱有利于光纤传输的优点. 系统已经在喷气 Z-pinch 实验中获得了成功的应用.

系统研制及实验过程中, 作者多次与温树槐、刘忠礼研究员讨论, 受益匪浅, 在此表谢意.

[1] Gerold Yonas 1998 *Fusion and the Z-pinch* (Scientific American) August

[2] Nash T J *et al* 1998 High Temperature Dynamic Hohlräume on the Pulsed Power Driver Z , SAND 98-1660C.

[3] Liberman M A *et al* 1998 *Physics of High-Density Z Pinch Plasmas* Springer

[4] Deeney C *et al* 1997 *Physical Review E* November

[5] Rochau G A *et al* 2000 Design of the PST :A Diagnostic for 1-D Imaging of Fast Z-Pinch Power Emissions , SAND 2000-1960C.

[6] Xiang S M and Ni G Q 1999 *The Imaging Principle of Photo-Electric Elements*(National Defence Industry Press) p192 – 193 (in Chinese)

[向世明、倪国强 1999 光电成像器件原理(国防工业出版社) 第 192—193 页]

One-dimensional imaging system for the diagnosis of the Z-pinch x-ray radiation *

Xu Rong-Kun Li Zheng-Hong Guo Cun Yang Jian-Lun Li Lin-Bo

Song Feng-Jun Ning Jia-Min Xia Guang-Xin Xu Ze-Ping

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry , China Academy of Engineering Physics ,Mianyang 621900 , China)

(Received 14 June 2002 ; revised manuscript received 20 October 2002)

Abstract

A temporal-spatial resolution system , which is composed of a slit , infra scintillator , optical fibre array , streak camera , image intensifier , etc. , is constructed for the diagnosis of the Z-pinch plasma. This system can effectively shield visible light and has an advantage of gaining flat response in the interested region of x-ray energy. The designed parameters and experimental results of gas-puff Z-pinch are presented in this paper.

Keywords : Z-pinch , x-ray , temporal-spatial resolution , image

PACC : 5270L , 0762 , 3220 , 4285F

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10035030).