

文章编号 :1001-4322 (2003) 04-0352-03

# 喷气 Z-pinch 高速扫描摄影技术研究\*

畅里华, 汪 伟, 刘宁文, 杨礼兵, 尚长水, 李 剑

(中国工程物理研究院 流体物理研究所,四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 叙述了高速摄影在阳加速器喷气 Z-pinch 实验中测量等离子体向心运动时的应用,用高速变像管扫描相机首次拍摄到阳加速器喷气负载为氖气状态下产生等离子体压缩过程的扫描像,该扫描像的时间分辨本领很高,可以观察到等离子体内爆压缩阶段整个过程,测得了该过程的直径随时间连续变化曲线。

**关键词:** 高速摄影; 高速变像管扫描相机; 喷气 Z-pinch; 等离子体

**中图分类号:** TB872

**文献标识码:** A

内爆 Z-pinch 是一种强的软 X 射线源,喷气 Z-pinch 是以气体作为负载来产生等离子体,其装置比较简单,不需要激光引发,与线和细丝相比较,喷气式不必每次放电后都要更换新线和细丝,而且产生的 X 射线的效率也高,其内爆技术的研究主要集中在 20 世纪 80 年代及 90 年代早期<sup>[1,2]</sup>。其中,等离子体半径、压缩速度与时间的关系是压缩过程中最为基本的参数,对于加速器的调试、评价加速器的工作特性以及进一步改进加速器来说,都起着极为重要的作用<sup>[3]</sup>。鉴于等离子体内爆速度快的技术特点,高速摄影就成为光学测试技术中一个不可或缺的测试手段。但一般的光机式高速相机已不能满足内爆技术对时间分辨的要求,在本次实验研究中,我们首次用高速变像管扫描相机拍摄了阳加速器在负载为氖气状态下等离子内爆箍缩过程的高时间分辨的扫描图像,得到了等离子体直径与时间变化的关系曲线以及等离子体内爆速度等物理参数<sup>[4,5]</sup>。

## 1 喷气 Z-pinch 原理

喷气 Z-pinch 的脉冲能源系统一般用 Marx 发生器产生高压脉冲,通过形成线、真空磁绝缘传输线、快速阀门将气体引入放电室,并在气体中通过脉冲大电流,引起气体电离产生等离子体,并利用强磁场使之箍缩。工作前将气体充满贮存室,试验时给阀中线圈输入脉冲电流,产生电磁力,开启快速喷气阀门,使气体经过喷口喷入放电室,此时,脉冲大电流通过环柱形气柱形成空心圆柱等离子体壳层大电流,在等离子体外产生的环向磁场将使等离子体内缘达到轴心后继续向中心压缩,不断提高其密度及温度,并发射粒子束及 X 射线。负载原理图如图 1 所示。

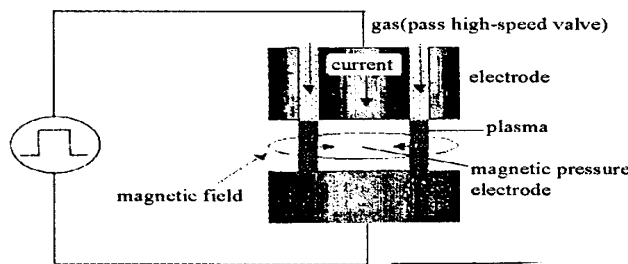


Fig. 1 Principle chart of gas-puff load

图 1 喷气负载原理图

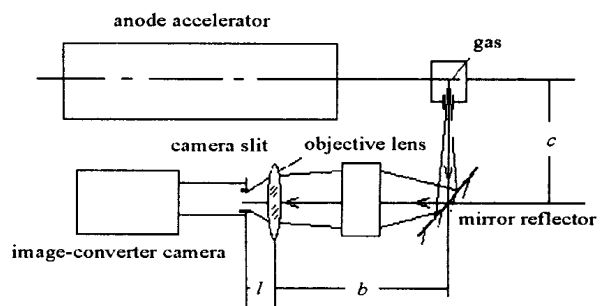


Fig. 2 Photography equipment of gas-puff Z-pinch

图 2 喷气 Z-pinch 摄影装置图

## 2 实验装置及其调试

### 2.1 实验装置

高速摄影实验装置如图 2 所示。

\* 收稿日期:2002-09-11; 修订日期:2002-12-05

基金项目:中国工程物理研究院基金资助课题(4210204)

作者简介:畅里华(1974-),女,山西祁县人,学士,助理工程师,目前从事高速摄影技术研究;绵阳 919-109 信箱。

由阳加速器产生强脉冲大电流,通过气体,使之产生高温高密度等离子体,经光学传输系统(包括反射镜、转像机构和摄影物镜)使气体壳层轴向与变像管相机狭缝方向垂直,并成像在相机的狭缝上。调节相机狭缝的宽度,选取气体壳层的微小部分作为研究对象,拍摄等离子体箍缩过程的一维图像。

### 2.2 被摄目标的发生与变像管相机触发时刻的同步

由于内爆过程极快,为拍摄到稳定、可靠的等离子体运动图像,必须保证变像管相机触发时刻与等离子体的形成和发展时刻同步。一般的方法是提前触发相机,但应尽量使扫描像成在像面的中前端。这就要求先对相机触发延迟时间进行精确测量。根据测得的延时值,以加速器前端电压信号为时间零点,约 340ns 后形成等离子体,此电压信号经电缆衰减、延时后触发变像管相机,获得等离子体向心运动的扫描像。

## 3 实验摄影图像及处理结果

### 3.1 实验摄影图像及图像处理

实验时选择相机扫描档 40mm/1μs(扫描速度 0.04 mm/ns)进行拍摄,相机时间分辨率约 3ns。图 3(a)是在阳加速器工作电压为 ±50kV,喷气负载为氖气,气体壳层外径为 40mm,高度为 24mm,厚度为 3mm 条件下拍摄的等离子体向心运动的扫描像。

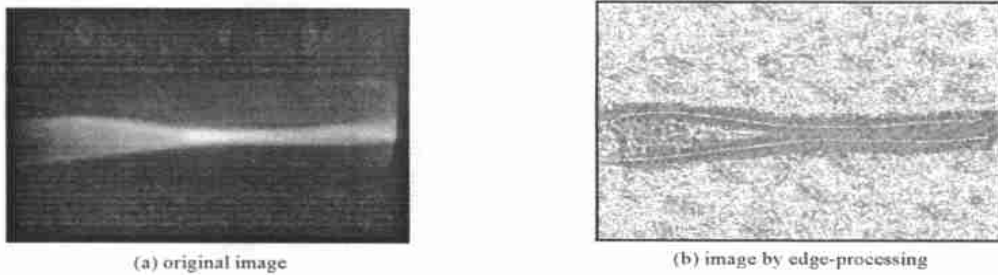


Fig. 3 Scanning image of plasma pinching

图 3 等离子体箍缩过程扫描像

图 3(b)是原始图像用 PDS-1010 微密度计扫入计算机经过图像处理后的等离子体界面图,每条扫描线间距 50μm,扫描步距 50μm × 50μm,共 512 × 512 个像素点。

### 3.2 实验处理结果

由于变像管相机扫描方向尺寸较大(40mm),所以像面上的扫描速度不均匀性较大,扫描时间也有较大的变化。所以必须对扫描时间进行标定,经过数据处理和方程拟合,得到扫描时间随像面位置的变化方程<sup>[6]</sup>。用皮秒激光脉冲光源和高精度延时发生器对相机 1μs 档进行标定,扫描时间与像面位置的拟合曲线见图 4,图中虚线为拟合曲线。

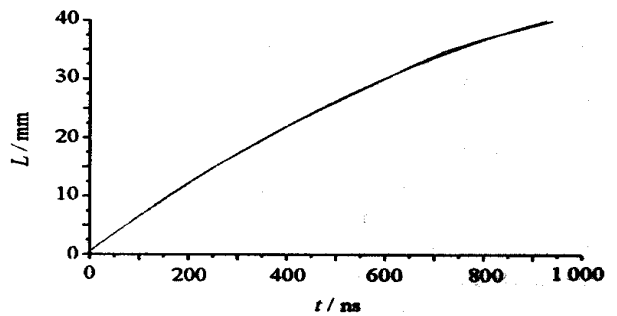


Fig. 4 Fitting curve of scanning time corresponding to image position

图 4 扫描时间随像面位置的拟合变化曲线

得到如下拟合方程:

$$L = 0.553 + 0.062t - 2.123 \times 10^{-5}t^2 \quad (1)$$

式中:  $L$  为距像面始端的距离;  $t$  为扫描时间。

测量已知大小( $\phi 10$  mm)铝棒静止像得到光学系统

实际放大倍数 = 1/11.3。根据像在荧光屏上放大倍数,测得扫描线上测量点距扫描起始点的距离  $L$  和该点图像上、下边缘的高度  $h_1, h_2$ (分别对应阳加速器轴线右侧和左侧等离子体外界面)。按照相机扫描时间随像面位置变化的拟合方程(1),将扫描距离转换成相应的扫描时间,对拍摄到的图像进行处理及数据分析,得到等离子体壳层界面随时间的变化曲线如图 5 所示。图 5 中横坐标为相机的扫描时间,图 5(a)中纵坐标为图像边缘距测量原点的距离  $h$ ,曲线 1 对应阳加速器轴线的右侧等离子体外界面,曲线 2 对应阳加速器轴线的左侧等离子体外界面。图 5(b)中纵坐标为等离子体壳层界面直径  $D$ 。

从图 5 中可以看出,在此工作状态下,等离子体箍缩是不对称的,其箍缩时间约为 240ns,箍缩比约为 4:1,内爆速度约为 125km/s。

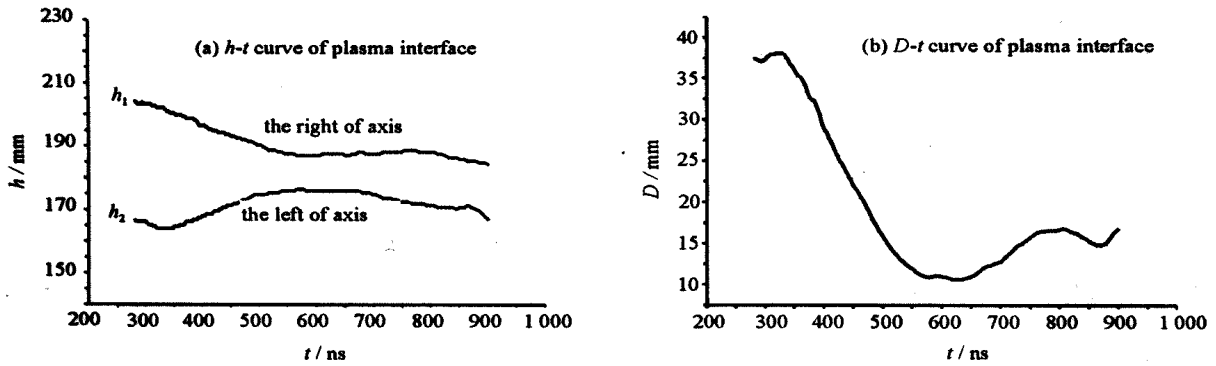


Fig. 5 Curves of plasma diameter

图 5 等离子体壳层变化曲线

根据上述实验结果观察到了喷气 Z-pinch 过程,但箍缩比小,内爆速度慢。经过对阳加速器的调试,得到图 6 的实验结果。图 6 是在与图 3 相同拍摄条件下所得的结果,从图 6 可以清楚地看到,调试后的等离子体箍缩时间明显变短,内爆速度有了较大的提高,图形上、下边缘对称性也有改善。

#### 4 结 论

通过本次实验研究,用高速摄影技术拍摄到阳加速器喷气 Z-pinch 产生等离子体箍缩过程扫描像。观察到等离子体箍缩阶段整个过程,测得了该过程的等离子体直径随时间连续变化曲线,这对开展阳加速器的进一步研究有较大的参考意义。

致谢 此工作得到中物院流体物理研究所谭显祥研究员的悉心指导,在此表示衷心感谢。

#### 参考文献:

- [1] 杨津基. 高温高密度磁化等离子体[M]. 北京:科学出版社,2000. (Yang J J. High temperature and density magnetized plasma. Beijing: Science Press,2000)
- [2] Liberman M A, De Goot J S, Toor A, et al. Physics of high density Z-pinch plasmas[M]. New York:Springer-Verlag, 1998.
- [3] Hammer J H, Spring P, De Goot J S. Modeling of high power Z-pinch[R]. UCRL-LR-105821-97-2.
- [4] 谭显祥. 高速摄影技术[M]. 北京:原子能出版社,1990. (Tan X X. Technique for high speed photograph. Beijing: Atomic Energy Press, 1990)
- [5] 谭显祥. 光学高速摄影测试技术[M]. 北京:科学出版社,1992. (Tan X X. Test technique for optical high speed photograph. Beijing: Science Press, 1992)
- [6] 汪 伟, 畅里华, 刘宁文, 等. 高速变像管相机扫描时间和扫描速度的标定技术[J]. 强激光与粒子束, 2002, 14(6): 827—830. (Wang W, Chang L H, Liu N W, et al. Calibration of scanning time and scanning velocity for high speed image-converter camera. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, 14(6): 827—830)

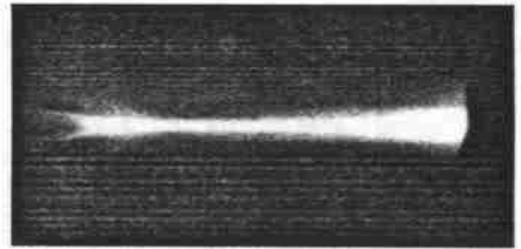


Fig. 6 Scanning image of plasma pinch after debugging

图 6 调试后等离子体箍缩过程扫描像

### Study on gas-puff Z-pinch by high speed photography

CHANG Li-hua, WANG Wei, LIU Ning-wen, YANG Li-bing, SHANG Chang-shui, LI Jian

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-109, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** This paper stated applying method of high speed photography to study centripetal motion of plasma generated by gas-puff Z-pinch internal explosion on anode accelerator. The scanning images with high temporal resolution of plasma pinching generated by anode accelerator applying Neon as gas-puff load, was obtained using image-converter streak camera. The process of plasma internal explosion pinching was observed, and the curves of plasma pinching diameter corresponding to scanning time were given.

**Key words:** High speed photography; High speed image-converter streak camera; Gas-puff Z-pinch; Plasma