

# 氩气 Z 箍缩内爆动力学过程实验研究\*

黄显宾† 杨礼兵 顾元朝 邓建军 周荣国 邹杰 周少彤 张思群  
陈光华 畅里华 李丰平 欧阳凯 李军 杨亮 王雄 张朝辉

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

(2005 年 7 月 14 日收到; 2005 年 12 月 6 日收到修改稿)

在太瓦级脉冲功率装置“阳”加速器上开展了一系列氩气 Z 箍缩内爆实验研究. 利用了高时空分辨的 X 射线纳秒分幅相机、可见光高速扫描相机、激光剪切差分干涉系统、X 射线针孔相机和软 X 射线功率谱仪对内爆动力学过程进行了诊断. 观测到了内爆中的“拉链”效应、“颈缩”效应、腊肠不稳定性等现象, 获得了等离子体温度变化和内爆速度变化等典型结果, 并分析了电流上升时间等因素对等离子体内爆过程的影响, 给出了相关结论.

关键词: Z 箍缩, 等离子体, “拉链”效应, 腊肠不稳定性

PACC: 5255E, 5255D, 5250L

## 1. 引 言

Z 箍缩等离子体辐射源是一种非常有效的强 X 射线源, 在材料特性、表面热处理、X 射线激光和惯性约束聚变能量等方面具有广泛的应用前景<sup>[1-3]</sup>. 目前用于产生 X 射线的 Z 箍缩负载包括金属丝阵、喷气负载以及相关的复合负载, 当加载脉冲参数一定时, 负载的质量和半径等因素决定了等离子体 X 射线辐射的产额. 针对目前国内现有的脉冲功率装置<sup>[4]</sup>驱动能力, 采用超声速喷嘴产生的气体(如氖气、氩气和氦气)及多金属丝负载来进行 Z 箍缩内爆实验是比较现实且可行的, 对研究等离子体在各个阶段的运动速度、密度和温度、内爆等离子体的形态和寿命, 优化负载参数、提高 X 射线输出、改善谱线特征等可以提供相关的依据.

1999 年, Katsuki 等<sup>[5]</sup>使用高灵敏度的多通道激光干涉系统测量了电极间初始气流壳层的空间分布, 通过实验认为喷气初始气流的空间分布对 Z 箍缩内爆过程有着非常重要的影响, 发现气流以超声速速度从喷嘴出口流向较低压力的真空靶室后, 气体以扇形的特征膨胀, 导致气体电离后形成的等离子体在箍缩过程中出现“拉链”现象, 并伴随磁流体不稳定性的发展. 1996 年, Krejci 等<sup>[6]</sup>利用四分幅高

速光电相机研究了氩气 Z 箍缩形成阶段的“拉链”效应(峰值电流为 150 kA, 1/4 周期时间为 1.1  $\mu$ s), 等离子体压缩的演变过程以及早期不稳定性的发展, 发现不稳定性演变到最后阶段导致等离子体柱被分解为若干个等离子体团的现象, 同时证明滞止在轴上的扭曲等离子体发射的波长为 20—200 nm 远紫外线占主导地位. 1998 年 Kubes 等<sup>[7]</sup>也利用纹影相机、高速可见光门控相机研究了喷气 Z 箍缩等离子体的发展过程, 观察到等离子体柱首先在阳极端形成箍缩, 然后沿轴向向阴极端箍缩, 产生“拉链”现象, 且在柱表面 5—10 mm 长度上有二、三个结点形成, 具有螺旋型特征. 1999 年, Robert 等<sup>[8]</sup>使用一个时间分辨的三维 MACH3 磁流体动力学模型模拟了土星装置上的氦气 Z 箍缩等离子体内爆动力学过程, 表明电流流过等离子体和回流柱时产生的磁场压力局部增强, 并对来自喷嘴的气体质量的轴对称分布产生扰动, 观察到了典型的气泡-尖刺结构, 与二维数值模拟结果一致. 2001 年, Henry 等<sup>[9]</sup>比较了 100 ns 和约 200 ns 内爆时间的双壳层喷气内爆实验中 K 壳层辐射 X 射线的产额表明, 随着内爆时间的增加, K 壳层输出产额降低, 意味着较短的内爆时间可较好地抑制箍缩等离子体不稳定性发展和提高 X 射线辐射功率.

我们在“阳”加速器上开展了一系列的氩气 Z

\* 国家自然科学基金(批准号: 10035030)资助的课题.

† E-mail: caephxb2003@yahoo.com.cn

箍缩内爆实验.采用 X 射线纳秒分幅相机、软 X 射线功率谱仪、激光剪切差分干涉系统、高速扫描相机和 X 射线针孔积分相机等设备进行了诊断.获得了 X 射线功率波形和等离子体内爆动力学过程图像,且结果具有非常可信的重复性.

## 2. 实 验

“阳”加速器是一台太瓦级的脉冲功率装置,在  $\pm 50$  kV 的工作电压下,负载电流约 500—650 kA,从 10% 到 90% 的上升时间约为 85 ns. 喷气负载区结构如图 1 所示.图 1 中喷气负载主要由一个开启瞬间速度接近 10 m/s 的快速电磁阀和超声速拉瓦尔喷嘴组成,实验中喷嘴安装在加速器阴极端,阳极端采用蜂窝状黄铜板作为电极.当电磁阀开启后,高压储气室内的气体通过拉瓦尔喷嘴产生沿轴心对称的圆环形气柱.实验中利用两个同型面不同出口宽度的喷嘴进行了氩气 Z 箍缩实验,其中储气室压力为  $4.05 \times 10^5$  Pa,喷管喉部大小均为 0.15 mm.喷嘴 1 出口外径为 20 mm,出口宽度为 5 mm,气柱高度为 15 mm,喷嘴 2 外径为 22 mm,出口宽度为 3 mm,气柱高度为 20 mm.采用 Navier-Stokes 方程和蒙特卡罗非定常流动模型程序对实验条件下两喷嘴的线质量密度进行了计算,结果表明两者线质量密度约为 13—15  $\mu\text{g}/\text{cm}$ .

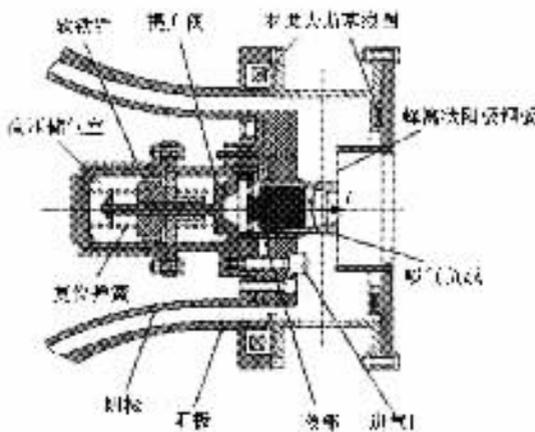


图 1 喷气负载区结构示意图

为了获取箍缩等离子体辐射产额、内爆动力学过程图像,采用包括软 X 射线辐射功率谱仪、X 射线纳秒分幅相机、X 射线针孔相机、激光差分干涉系统和高速扫描相机等设备对箍缩等离子体进行了诊断,实验诊断布局如图 2 所示.

软 X 射线辐射功率谱仪主要由 ST-401 型闪烁体和 GD401 型光电管组成,主要利用 ST-401 型闪烁体在 50—1500 eV 具有平响应的特性来测量箍缩区 X 射线辐射功率随时间的变化过程,并可计算出软 X 射线辐射功率产额.谱仪中的 ST-401 型闪烁体距等离子体源的距离为 1 m.

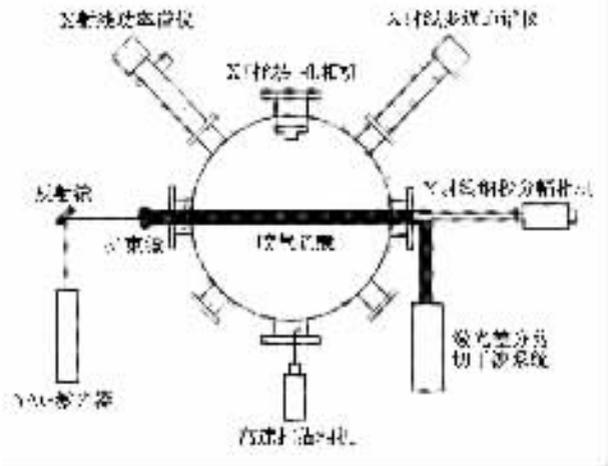


图 2 喷气 Z 箍缩实验诊断布局示意图

X 射线纳秒分幅相机主要用来记录等离子体形态随时间的演变图像,诊断等离子体各种不稳定性的发展过程和能量输运过程.综合其他诊断方法推断等离子体的密度和温度随时间的发展过程、X 射线和等离子体作用的各种物理机制等.实验中 X 射线纳秒分幅相机的响应范围为 0.1—10 keV,曝光时间为 5 ns,帧间隔为 10 ns,画幅尺寸为 5 mm  $\times$  9 mm.实验中从第 1 幅图像到第 6 幅图像的针孔直径为 100  $\mu\text{m}$ ,第 7 幅图像到第 10 幅图像的针孔直径为 50  $\mu\text{m}$ .

X 射线针孔相机为单针孔,针孔制作在钽片基底上,直径约为 100  $\mu\text{m}$ .采用 Mylar 膜上镀铝作为滤片和 5FW 型底片记录,成像比例为 2:1.

激光差分干涉系统主要由能量约为 90 mJ 及脉冲半高宽为 5 ns 的 YAG 激光器、扩束镜、光路转折装置、剪切差分干涉仪和照像系统等组成.系统可使被检测的波面分成两个有微小错位的波面并产生干涉,通过对干涉图样进行分析,可以得到等离子体某一时刻的密度分布和位形轮廓.

高速扫描相机系统利用光学传输系统(包括反射镜、转像机构和摄影物镜)使等离子体轴向与相机狭缝方向垂直,并成像在相机的狭缝上.通过调节相机狭缝的宽度,选取等离子体壳层的微小部分作为研究对象来获得等离子体箍缩过程(径向随时间的

连续变化)具有高时间分辨本领的一维图像。

### 3. 实验结果及讨论

$Z$  箍缩内爆的主要目的是产生强 X 射线辐射,内爆等离子体被箍缩到中心轴附近减速、停滞,形成内爆坍塌,产生高温并伴随强辐射。所以在整个箍缩过程中,能量的传递由电磁能转换成动能、内能,进而转换成辐射能。图 3 是一个典型的驱动电流波形和软 X 射线脉冲波形。从图 3 可见,等离子体产生强 X 射线辐射时刻处于电流峰值附近,脉冲半高宽为 45 ns 左右,等离子体辐射坍塌的同时负载区电感发生急剧变化,导致此时电流波形产生振荡。同时在实验中通过调节负载的质量,较好控制了内爆坍塌时刻(延迟于电流峰值后),一定程度上提高了能量的转换效率,使电磁能得到充分的利用。利用软 X 射线功率谱仪(测量范围为 50—1500 eV)获得的箍缩辐射能量最高达 0.8 kJ,功率 12 GW,同时根据 X 射线多通道谱仪获得结果初步估算 X 射线辐射温度约 40 eV,该温度具有一定的不确定度。我们希望在下一轮实验中利用在北京同步辐射装置的软 X 射线标定站再次标定过的谱仪对实验测量结果进行修正,以获得辐射场的真实状况。

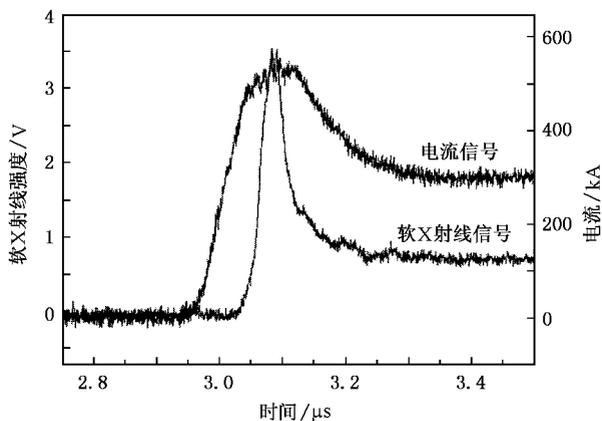


图 3  $Z$  箍缩负载电流与软 X 射线波形

时空分辨的等离子体内爆图像可以给出等离子体内爆轨迹、内爆时间、内爆速度、温度变化、不稳定性发展趋势等物理信息。图 4 是 X 射线纳秒分幅相机拍摄的氩气箍缩图像(喷嘴 1),图像上端为阳极,下端为阴极。负载峰值电流 560 kA,从 10% 到 90% 的上升时间为 82 ns。第 1 幅图像拍摄起始时间为 X 射线峰值前 73.5 ns,第 9 幅图像由于成像小孔堵塞未拍摄到。首先,我们从图 4 第 1、第 2、第 3 幅像可

以观察到放电初期等离子体壳层呈喇叭状,且在靠近阳极端的等离子体未沿喇叭状位形继续扩散,而是开始向轴心收缩。这与喷气负载气体壳层的初始位形模拟结果<sup>[6]</sup>相符,因为当气体从喷嘴向真空靶室喷出形成圆环状气柱后,在壳层与对称轴之间形成了一个很大的分离涡,在漩涡的抽吸作用下分离涡下游气流逐渐向对称轴靠拢,导致此处初始气柱产生“颈缩”效应。同时还可以观察到气体柱的电离在初始时刻是不均匀的,形成几条相互分开的带状电流通道。经分析认为,这主要是由气体被主电流电离击穿过程具有随机性,导致的放电通道初始不均匀造成的。但随着电流的增大,这些通道逐渐融合,并在同一轴向高度温度逐渐趋于一致,如图 4 中第 4、第 5、第 6 幅像。在多次的实验中均发现,沿轴向方向靠近阴极端的等离子体温度自始至终都高于靠近阳极端的等离子体温度。

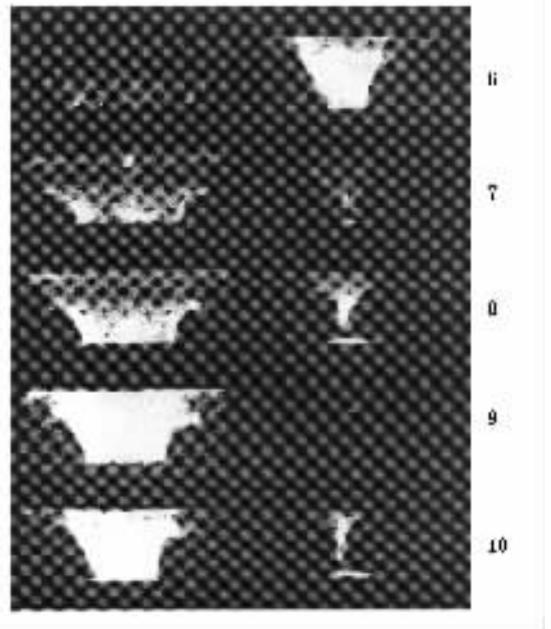


图 4 氩气  $Z$  箍缩的 X 射线分幅像

从图 4 中也可以清晰地观察到等离子体从阴极端向阳极端运动的“拉链”效应;“拉链”速度平均达到  $2 \times 10^7$  cm/s 以上。同时,等离子体壳层在“拉链”效应和磁场洛伦兹力的双重作用下,内爆速度也随着流过等离子体壳层电流的不断增大而沿轴向变化。在放电初期阶段,向内箍缩的速度较低,在接近电流峰值附近时刻,速度急剧增大,但沿轴向的内爆速度分布不均匀。图 5 给出了图 4 中各分幅图像中等离子体壳层沿  $Z$  轴的内爆速度曲线,其中局部内爆速度高达  $4.4 \times 10^7$  cm/s,发生在喇叭状位形膨胀

的最大直径处,最小内爆速度为  $2.27 \times 10^7$  cm/s.

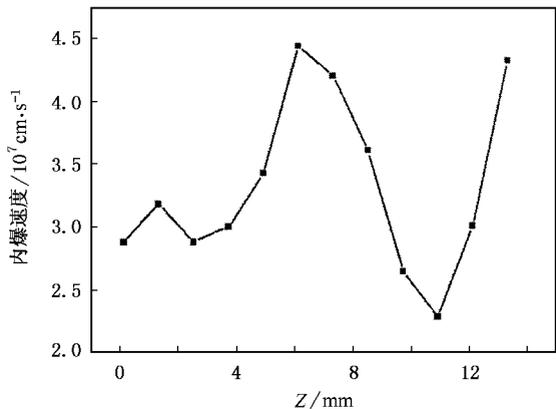


图5 等离子体壳层沿轴向上的内爆速度曲线

另外,从图4也可以看出,腊肠型( $m = 0$ )不稳定性开始于第4幅(X射线峰值前的 $-43.5$  ns时刻)接近喷嘴出口的阴极端.随着时间的发展,等离子体柱上不稳定由阴极向阳极逐渐发展,到第7幅图像(X射线峰前 $13.5$  ns时刻),靠近喷嘴出口处的等离子体柱已经在 $m = 0$ 不稳定性作用下断裂,且从第8幅和第10幅图像可以发现,断裂后的等离子体柱仍存在“拉链”效应,等离子体柱仍在由阴极端向阳极运动,内爆等离子体仍在向轴心压缩,并伴随扭曲型不稳定性的发展.

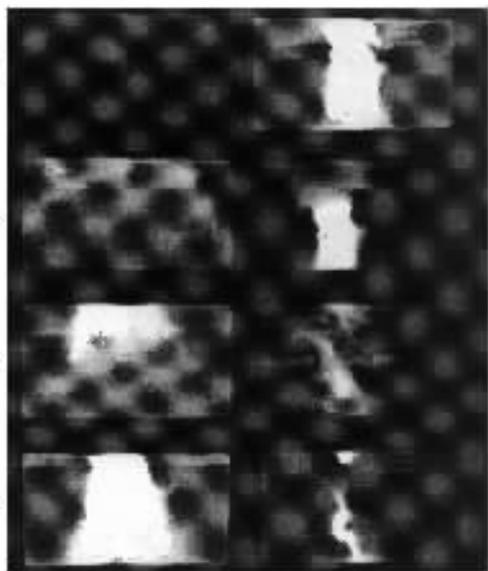


图6 氩气 Z 箍缩的 X 射线分幅像(喷嘴 2)

图6为拉瓦尔喷嘴2的一次内爆过程的X射线图像,物像比例2:1,上端为阴极,下端为阳极,负载峰值电流610 kA,从10%到90%的上升沿时间为75

ns,X射线峰值处于电流峰值时刻,第一幅图像拍摄于X射线峰前40 ns,幅间隔10 ns.从这幅图上我们可以发现,除了具有图4中某些内爆等离子体相同的特征之外, $m = 0$ 不稳定性的发展开始于X射线峰值前10 ns之内,且也首先在喷嘴出口端附近坍塌,此时其余部分的喇叭状等离子体壳层已箍缩得较为均匀,并可观察到腊肠型不稳定性产生,如图6中第6幅像,此时为X射线峰值后10 ns.值得注意的是,在重复实验中,我们适当增大负载气体高度后还观察到另外一个现象.在等离子体柱箍缩后期,阳极端等离子体先于阴极端等离子体崩溃,且剩余的等离子体出现明显的腊肠型不稳定性现象,这也与初始负载气体位形相关,因为气流从阴极喷向阳极且呈喇叭状扩散中,由于壳层中心分离涡的作用,靠近阳极端区域的气体沿轴向方向运动的同时又径向收缩,导致阴极和阳极附近等离子体均出现“拉链”现象,但阳极端等离子体的内爆速度大于阴极端等离子体内爆速度,并随后首先崩溃.观察图6中第7幅像可以发现,在阴极端等离子体坍塌崩溃后,等离子体柱温度降低,但腊肠型不稳定性及瑞利-泰勒不稳定性现象加剧,并开始出现扭曲现象和局部连续热区.图6第8幅像中,阴极端温度较高的电极金属等离子体已非常显著,在靠近阳极端的中部等离子体出现类似于螺旋形的结构,这与获得的干涉像和针孔积分像结果符合,如图7、图8(d)所示.

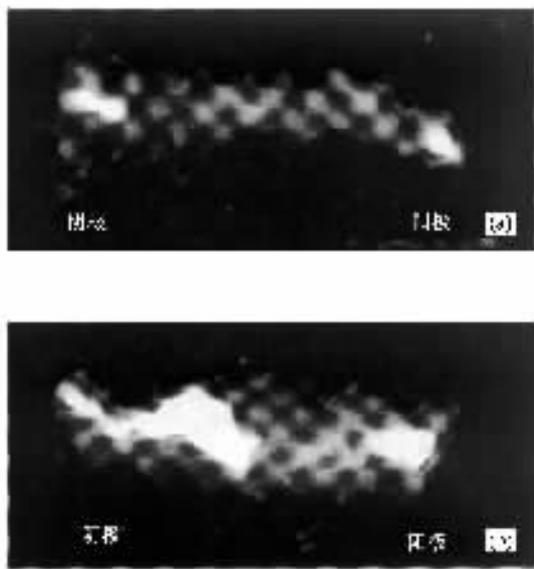


图7 X射线针孔积分像 (a)04111901发 (b)04111903发

图7为针孔相机拍摄的拉瓦尔喷嘴2实验中的两发X射线积分像.从图7不但可以观察到阴极、

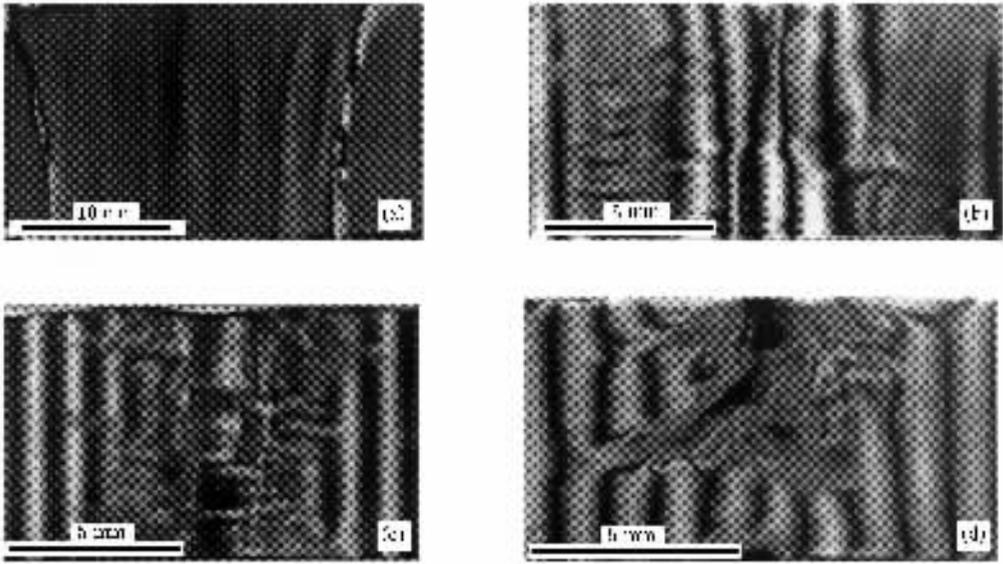


图 8 激光差分干涉像 (a)04120803 发, 电流峰值前 19 ns (b)04112004 发, 电流峰值前 19 ns (c)04111901 发, 电流峰值前 6 ns (d)04111903 发, 电流峰值后 21 ns

阳极两端在箍缩后期均有金属高温等离子体产生, 同时也发现受喷气负载位形影响, 等离子体热区具有离散热点和连续热区两种不同的分布形态, 显示腊肠型不稳定性和瑞利-泰勒不稳定性对等离子体压缩过程均有重要影响. 图 8 为几次不同实验(喷嘴 2)的激光剪切差分干涉图像(不同时刻). 图 8(a)为拍摄于电流峰值前 107 ns 的图像, 其中负载峰值电流 456 kA, 从 10% 到 90% 的上升时间为 115 ns, 计算

表明此时等离子体电子密度约  $2 \times 10^{19} / \text{cm}^3$ . 图 8(b)拍摄于电流峰值前 14 ns 时刻, 其中负载峰值电流 637 kA, 上升时间 85 ns, 此时等离子体壳层正高速向轴心运动. 图 8(c)拍摄于电流峰值前 6 ns 时刻, 其中负载峰值电流 416 kA, 从 10% 到 90% 的上升时间为 80 ns, 此时较高密度的等离子体直径已经箍缩到约 2 mm 大小, 且后续等离子体仍高速向轴心汇聚, 但径向两端等离子体密度不一致, 在阳极端由于蜂

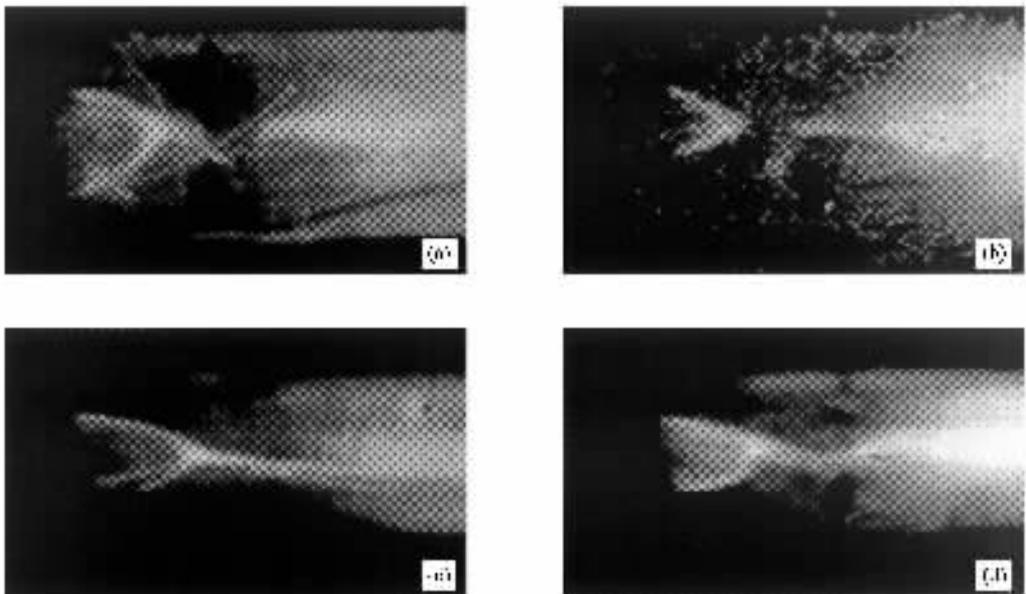


图 9 高速扫描内爆等离子体像 (a)04112101 发, 箍缩时间约为 90 ns (b)04112004 发, 箍缩时间约为 51 ns, (c)04112101 发, 箍缩时间约为 108 ns (d)04112103 发, 箍缩时间约为 200 ns

窝状铜板的存在引起了等离子体的反射.图 8(d)拍摄于电流峰值后 21 ns 时刻,此时可清楚地观察到阴阳电极两端产生的高温金属等离子体.分析图 8 中干涉像可以发现,尽管可从其中观察到等离子体较为精细的结构,但不能完成内爆中后期等离子体密度的演算,因为此时等离子体密度及梯度变化太大导致干涉条纹剧烈扭曲和断裂.下一步实验中准备采用离焦 4f 系统来减小干涉仪剪切量,以便获得完整、可处理的干涉条纹.

图 9 是可见光变相管扫描相机进行狭缝拍摄获得的不同发次的等离子体扫描像.图 9(a)中负载电流为 657 kA,箍缩时间约为 90 ns,箍缩比为 7:1,平均箍缩速度为  $2.15 \times 10^7$  cm/s.图 9(b)中负载电流为 637 kA,箍缩时间约为 51 ns,箍缩比为 5:1,平均箍缩速度约为  $2.59 \times 10^7$  cm/s.图 9(c)中因测试线圈接触不良未测到负载电流结果,箍缩时间为 108 ns,箍缩比约为 6:1,平均箍缩速度约为  $1.73 \times 10^7$  cm/s.图 9(d)中负载电流为 462 kA,拍摄到的箍缩时间为 200 ns,箍缩比约为 11:1,箍缩速度约为  $1.37 \times 10^7$  cm/s.根据以上结果并结合 X 射线分幅像、干涉像分析表明,等离子体内爆速度随负载电流增大、上升时间的相对缩短而逐渐增大,当箍缩到停滞时刻时沿 Z 轴各点的内爆速度达到最大,且等离子体壳层箍缩对称性更一致,阴极、阳极间等离子体温度差别也相应减小,同时相应减小了“拉链”效应的影响.

## 4. 结 论

本文比较系统地介绍了“阳”加速器上喷气 Z

箍缩负载结构、参数,实验诊断布局 and 结果,分析了氩气 Z 箍缩内爆过程中等离子体的位形演变、“拉链”效应、内爆速度和不稳定性等现象.

1) 快脉冲电流作用下气体击穿而形成的等离子体通道具有较大的随机性,电流主要从壳层表面的几个主要通道非均匀流过.

2) 喷气负载位形影响初期等离子体位形.沿 Z 轴方向“喇叭”状位形导致了等离子体从阴极向阳极的“拉链”效应,“拉链”速度达到  $10^7$  cm/s 以上,同时也导致沿 Z 轴内爆速度的不一致,局部内爆速度可达  $4.4 \times 10^7$  cm/s.气流壳层的“颈缩”位形导致箍缩等离子体柱在此处先行崩溃.

3) 不稳定性现象主要发生在箍缩中后期,快速增长的  $m = 0$  不稳定性占主导地位,其次为  $m = 1$  不稳定性及 R-T 不稳定性.等离子体飞散后阴阳电极产生了高温金属等离子体,且箍缩过程中阴极端等离子体密度总高于阳极端等离子体密度.

4) 增大负载驱动电流,相对缩短电流上升时间,可相对提高等离子体柱沿轴向的内爆速度,并使等离子体柱阴阳电极温度快速趋于一致,同时可减小“拉链”效应和不稳定性的影响.

通过实验,初步了解了箍缩等离子体内爆的一些演变过程及现象,并给出了相应结论,但箍缩等离子体的现象十分复杂,仍须进行更多的实验和提高诊断设备时空分辨和绝对测量能力来进行验证和分析.

感谢中国工程物理研究院核技术与化学研究所的许泽平副研究员、宁家敏助理工程师在实验测试中的帮助.

- [1] Deeney C, Nash T J, Spielman R B et al 1997 *Phys. Rev. E* **56** 5945
- [2] Ning C, Yang Z H, Ding N 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 810 (in Chinese) 宁成、杨震华、丁宁 2004 物理学报 **53** 810]
- [3] Yang L B, Liao H D, Sun C W et al 2004 *Chin. Phys.* **13** 1747
- [4] Qiu A C 2000 *Eng. Sci.* **2** 24 (in Chinese) 邱爱慈 2000 中国工程科学 **2** 24]
- [5] Katsuki S, Murayama K, Nishi T et al 1999 *IEEE 12th*

*International Pulsed Power Conference* **2** 1067

- [6] Krejci A, Kolacek K, Kravarik J et al 1996 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **24** 22
- [7] Kubes P, Kolacek K, Krejci A et al 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 1113
- [8] Robert R E, Rodderick N F, Colella S et al 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 118
- [9] Henry S, Banister J, Failor B H et al 2001 *Phys. Plasmas* **8** 3135

# Experimental studies of the argon-puff $Z$ -pinch implosion process<sup>\*</sup>

Huang Xian-Bin<sup>†</sup> Yang Li-Bing Gu Yuan-Chao Deng Jian-Jun Zhou Rong-Guo Zou Jie

Zhou Shao-Tong Zhang Si-Qun Chen Guang-Hua Chang Li-Hua Li Feng-Ping

Ouyang Kai Li Jun Yang Liang Wang Xiong Zhang Zhao-Hui

( *Institute of Fluid Physics ,China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 ,China* )

( Received 14 July 2005 ; revised manuscript received 6 December 2005 )

## Abstract

A preliminary experiment for studying the argon-puff  $Z$ -pinch implosion process has been performed on the Yang accelerator. The ten-frame nanosecond temporal and spatial gated camera, visible high-speed scanning camera, differential laser interferometer, X-ray time integration pinhole camera and X-ray power system have been used to investigate the evolution of the argon-puff  $Z$ -pinch. Some typical results of argon-puff  $Z$ -pinch during implosion and pinch phase, including the "zipper" effect, necking phenomenon, sausage instability, temperature changes and the effect of load current rise time, are given and analyzed as examples, and some relevant conclusions are drawn.

**Keywords :**  $Z$ -pinch, plasma, "zipper" effect, sausage instability

**PACC :** 5255E, 5255D, 5250L

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant No. 10035030 ).

<sup>†</sup> E-mail : caepxb2003@yahoo.com.cn