

单壳层喷气 Z 箍缩内爆特性分析*

任晓东† 黄显宾 周少彤 张思群 李 晶 杨礼兵 李 平

(中国工程物理研究院流体物理研究所 绵阳 621900)

(2008 年 12 月 17 日收到 2009 年 3 月 26 日收到修改稿)

在“阳”加速器(电流峰值为 500—850 kA, 上升时间约为 85 ns)上利用单壳层喷气负载开展了 Z 箍缩等离子体内爆实验, 获得了等离子体的辐射产额、X 光辐射图像等诊断结果. 利用相应的诊断结果, 定义了内爆时间, 对内爆过程的主要阶段进行了划分, 研究了等离子体位形、辐射强度分布等实验现象, 同时对等离子体的内爆轨迹、内爆质量、径向收缩比、磁流体不稳定性等进行了初步分析.

关键词: 喷气负载 Z 箍缩, 等离子体内爆, X 光辐射功率, “阳”加速器

PACC: 5255E, 5255D, 5250L

1. 引 言

Z 箍缩可以被用于产生非常有效的强 X 光源^[1,2]和强中子源^[3], 在惯性约束聚变(ICF)、高密度物理(HEDP)以及实验室天体物理等领域有着广阔的应用前景. 研究 Z 箍缩等离子体内爆过程和辐射机理是探索提高 X 光辐射功率和产额的重要途径. 金属丝阵^[4,5]、双壳层喷气负载^[6]的使用极大地提高了 X 光辐射功率, 但开展此类实验需要具备几兆安到几十兆安驱动能力的脉冲功率平台. 国内现有脉冲功率装置如“强光”一号^[7]和“阳”加速器^[8]的驱动能力在 1 MA 左右的水平, 仅能开展有限质量(几十微克到百微克)的金属丝阵和喷气 Z 箍缩实验, 获取的辐射产额较低, 但可以开展 Z 箍缩等离子体内爆过程^[9]、辐射机理、磁流体不稳定性以及负载参数优化^[10]等实验研究, 同时也可对 Z 箍缩数值模拟^[11]提供一定的实验数据, 为在更高驱动能力的装置(如 PTS 装置^[12], 10 MA, 90 ns)上开展 Z 箍缩实验研究奠定基础.

本文介绍了在“阳”加速器上开展的单壳层喷气 Z 箍缩实验, 实验中用相关测试系统对等离子体的辐射参数、内爆动力学过程进行了诊断, 利用相应的诊断结果对单壳层喷气负载的内爆特性进行了初步分析, 对初始等离子体的形成和特征、Z 箍缩内爆

动力学过程、磁流体不稳定性等进行了分析, 获得了一些关于单壳层喷气 Z 箍缩等离子体内爆特性的规律性认识. 由于受装置驱动能力与诊断设备性能制约, 较为深入的研究工作仍有待实验的进一步开展.

2. 负载和实验设置

单壳层喷气 Z 箍缩实验在“阳”加速器上开展. “阳”加速器主要由 3 路串联充电并联放电的 Marx 发生器、Blumlein 脉冲形成线、8 路同步主开关、水介质脉冲传输线和真空磁绝缘传输线等几个部分组成. 实验条件下 Marx 发生器充电电压为 50 kV, 可为负载提供峰值约为 500—850 kA、上升时间(10%—90%)约为 80—110 ns 的驱动电流. 根据实验条件下装置的驱动电流, 利用雪耙模型对负载线质量密度进行的估算表明, 与“阳”加速器相匹配的负载线质量密度约为 15—60 $\mu\text{g}/\text{cm}$.

喷气负载主要由能源系统、储气室、快速电磁阀和拉瓦尔喷嘴组成. 超音速拉瓦尔喷嘴结构决定了气流位形分布及线质量密度. 实验中使用了两种喷嘴(1 号和 2 号), 二者具有相同的出口尺寸, 内直径为 9 mm, 外直径为 15 mm, 不同在于 1 号喷嘴喉部尺寸为 0.4 mm, 负载长度设置为 15 mm, 2 号喷嘴喉部尺寸为 0.3 mm, 负载长度为 19 mm. 根据上述喷嘴参

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 10635050)资助的课题.

† E-mail: amosrd@yahoo.cn

数 利用文献 [13] 中的模拟程序对流场进行了计算, 结果表明两种喷嘴产生的气流初始位形非常近似. 图 1 显示了储气室压力为 1 atm (1 atm = 101.325 kPa) 时数值计算给出的 1 号喷嘴流场密度分布和两个喷嘴的线质量密度. 从图 1(b) 可以看出, 气流接近稳定时 1 号喷嘴的线质量密度约为 $43 \mu\text{g}/\text{cm}$, 2 号喷嘴约为 $32 \mu\text{g}/\text{cm}$.

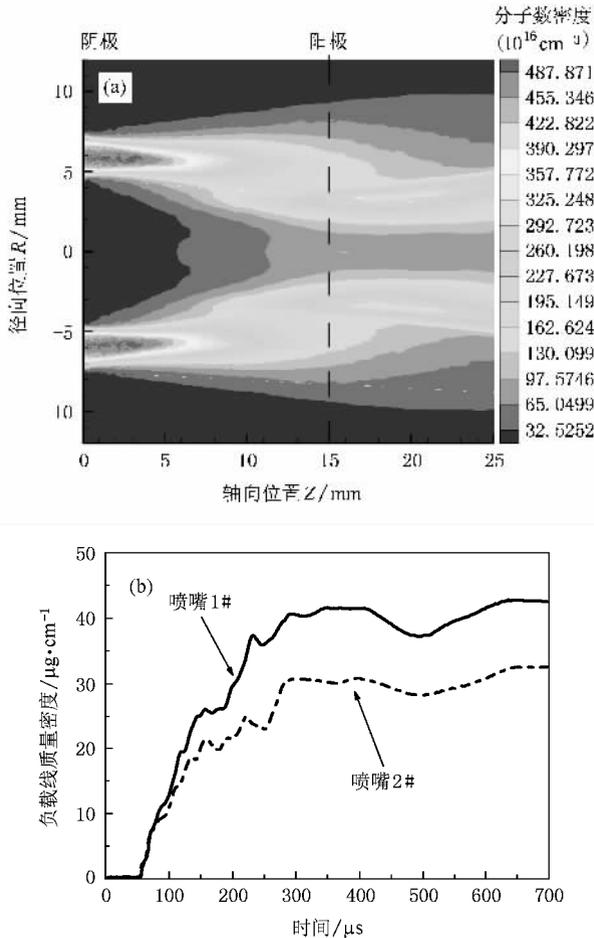


图 1 数值计算获得的 1 号喷嘴流场密度分布和两个喷嘴的线质量密度 (a) 1 号喷嘴流场密度分布 (b) 两个喷嘴的线质量分布

实验中拉瓦尔喷嘴置于阴极端, 阳极端由透气率高达 90% 的铜丝网组成, 工作气体为氩气. 采用罗戈夫斯基线圈测量流经负载的电流; 在 X 光辐射测量中, 利用八通道软 X 光滤波 Dante 谱仪 (测量范围 50—1500 eV, 系统测量不确定度小于 20%) 和软 X 光闪烁体功率计 (测量范围 50—1800 eV, 系统测量不确定度约为 30%) 测量软 X 光功率时间谱; 利用 X 光纳秒分幅相机获取等离子体内爆的时空分辨像. 相机的光谱响应范围是 0.1—10 keV, 单幅曝光时间在 1—5 ns 范围内可调, 画幅间隔在 2.5 和 10

ns 可调, 相对时间抖动不高于 5%, 系统空间分辨率大于 13 lp/mm. 利用碳滤片和掠入射反射镜相组合的软 X 光窄能带针孔相机获取 X 光积分像, 能量范围为 210—277 eV; 另外, 还采用了只带碳滤片的针孔相机来测量 X 光的积分像, 其能量范围覆盖 150—284 eV 和碳 K 吸收边以后的高能部分.

3. 实验结果及分析

通过实验中获取的电流和 X 光功率波形可以对箍缩等离子体的内爆时间以及内爆过程的主要阶段进行分析. 利用 X 光辐射图像给出的等离子体位形特征和内爆发展过程, 可以分析等离子体的内爆轨迹、内爆速度和径向收缩比等特性, 此外还可以观察到磁流体不稳定性等现象. 本文介绍的单壳层喷气实验共有 30 余次, 实验结果具有较高的重复性, 下面就其中几发典型的实验诊断结果进行初步分析.

3.1. Z 箍缩基本过程和内爆时间

典型的负载电流和软 X 光功率波形如图 2 所示, 二者分别由罗戈夫斯基线圈和软 X 光闪烁体功率计测量得到. 图中选取 X 光的峰值时刻为时间零点. 根据文献 [14] 中对内爆时间 t_{imp} 的测量方法, 分别对负载电流和软 X 光功率波形各自上升沿的 25%—75% 区间进行了线性拟合, 并将两条拟合直线在时间轴上的间隔定义为 Z 箍缩的内爆时间.

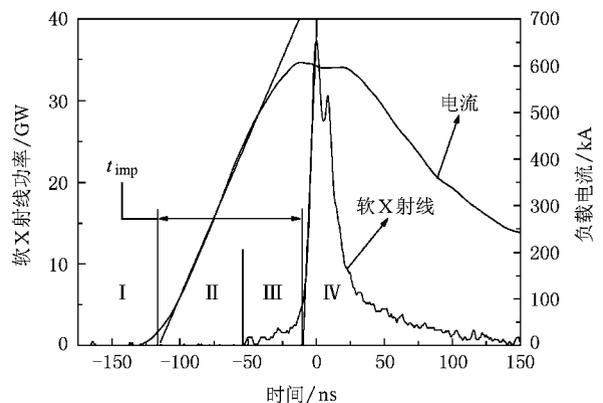


图 2 利用负载电流与软 X 光功率波形定义的内爆时间和内爆过程主要阶段

图 2 中的罗马数字代表了 Z 箍缩发展的四个阶段: I 为初始阶段, 以电流的开始为起点, 到电流主脉冲上升沿拟合直线与时间轴的交点结束; II 为

电离阶段,处于电流主脉冲上升期间,负载电击穿产生初始等离子体;III为内爆加速阶段,起始于等离子体开始向内加速运动时刻,由 X 光功率波形和等离子体内爆图像确定;IV为滞止热化阶段,其起始时刻定义为 X 光波形上升沿拟合直线与时间轴的交点。

在本文的讨论中,各实验发次测得的内爆时间均按照此处的定义给出。表 1 列出了部分典型的喷气 Z 箍缩实验结果。按照上述等离子体内爆阶段的划分方法,得出单壳层喷气 Z 箍缩等离子体内爆加速阶段 III 约占内爆时间的 40%—50%。

表 1 典型喷气 Z 箍缩实验的负载电流、内爆时间、X 光功率和产额以及分幅像曝光时间

| 实验发次 | 喷嘴和负载高度/mm | 峰值电流/kA | 电流上升时间/ns | 内爆时间/ns | 内爆加速阶段占内爆时间的比例/% | X 光功率/GW | X 光能量/kJ | 相机曝光时间/ns |
|------|------------|---------|-----------|---------|------------------|----------|----------|-----------|
| 1009 | (1号)15 | 615 | 78 | 106 | 45±5 | 36.4 | 0.89 | 5 |
| 1010 | (1号)15 | 536 | 98 | 129 | 43±5 | 27.9 | 0.59 | 5 |
| 1022 | (1号)15 | 576 | 99 | 126 | 40±5 | 19.8 | 0.57 | 5 |
| 1023 | (2号)19 | 580 | 80 | 98 | 51±5 | 29.0 | 0.70 | 5 |
| 1024 | (2号)19 | — | 79 | 101 | 45±5 | 28.5 | 0.71 | 5 |
| 1025 | (2号)19 | 480 | 100 | 143 | 41±5 | 24.0 | 0.59 | 2 |
| 1027 | (2号)19 | 484 | 109 | 139 | 42±5 | 21.3 | 0.73 | 2 |

3.2. 等离子体图像

图 3 和图 4 分别给出了实验获取的典型 X 光分幅像,以 X 光功率波形的峰值时刻为时间零点,图左端为阳极,右端为阴极。图 3 中幅间隔时间 5 ns,单幅曝光时间 5 ns,第一幅像拍摄时刻为 X 光峰前 57 ns,图 4 中幅间隔时间 10 ns,单幅曝光时间 5 ns,第一幅像拍摄时刻为 X 光峰前 31 ns。

从图 3 和图 4 的前三幅图像可以观察到靠近阳极端等离子体的辐射强度明显强于阴极端,且呈明显的“喇叭”状,阴极至阳极端的扩散角度近 20° ,与图 1(a)中喷气流场数值模拟结果基本一致。国内外的实验结果^[8,15]均表明,“喇叭”状位形会导致“拉链”效应并影响辐射功率。值得注意的是,在本文的喷气 Z 箍缩实验中并未观察到等离子体内爆的“拉链”效应(如图 3 和图 4 所示),这是由于等离子体壳层沿轴向的内爆速度存在差异。如图 5 所示,沿轴向的等离子体平均内爆速度从阳极向阴极逐渐减小,靠近阳极端的内爆速度约为 1.8×10^7 cm/s,而靠近阴极端约为 0.8×10^7 cm/s。内爆速度的差异可能是由喷气负载密度分布所致,如图 1(a)所示,在阴极端气流质量主要集中在喷嘴出口处,而越靠近阳极气流质量的分布越弥散。因此,尽管半径较大的阳极端等离子体受到的磁压较阴极小,但由于早期参与内爆的质量也较小,导致阳极端等离子体的内爆速度反而更大。轴向内爆速度的差异最终导致滞止前的箍缩等离子体柱半径趋于一致(见图 4(c)(d)),这提高了内爆等离子体在轴向上滞止的同步性。

另外,内爆过程中我们多次观察到轴心处存在

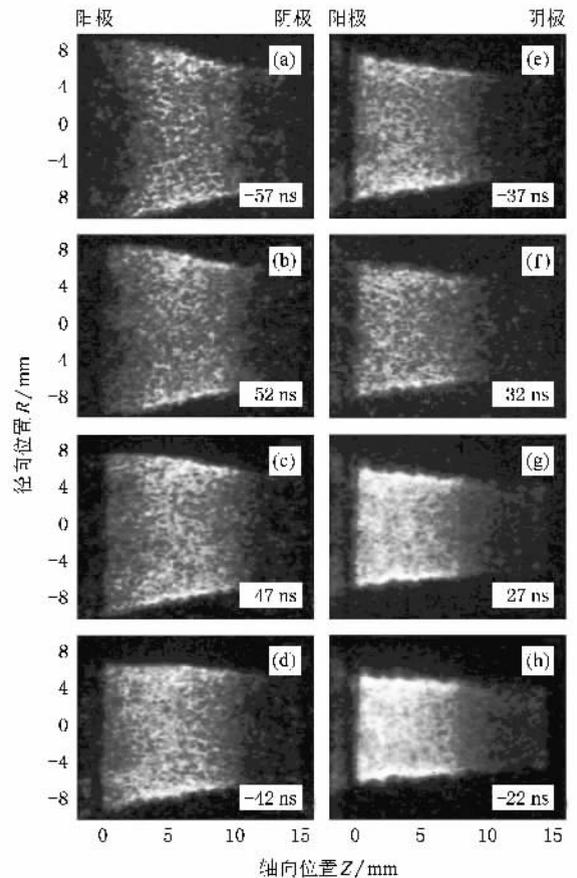


图 3 发次 1010 等离子体分幅像 (a) - 57 ns, (b) - 52 ns, (c) - 47 ns, (d) - 42 ns, (e) - 37 ns, (f) - 32 ns, (g) - 27 ns, (h) - 22 ns

辐射强度较高的等离子体柱,如图 6 和图 7 所示。图 6 和图 7 中像幅间隔时间均为 5 ns,单幅曝光时间为 2 ns,左端为阳极,右端为阴极,喷嘴出口位于阴极

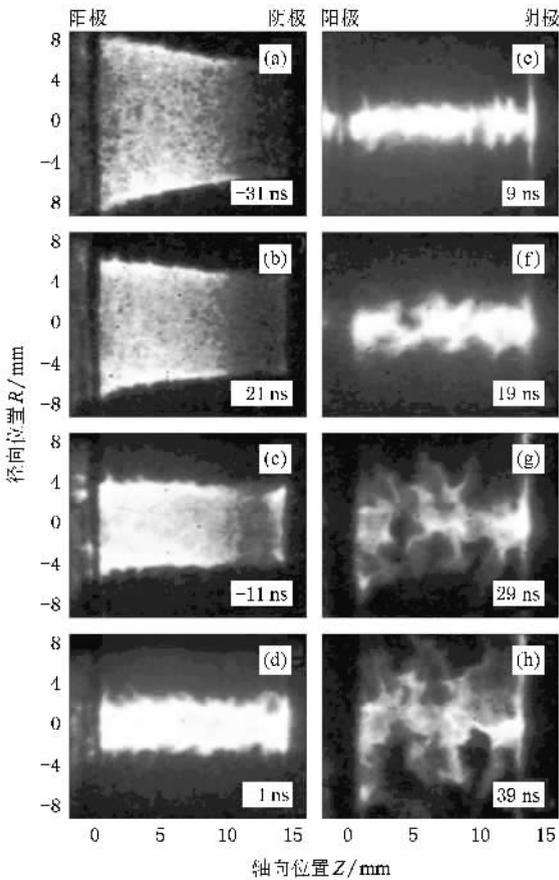


图4 发次 1009 等离子体分幅像 (a) - 31 ns, (b) - 21 ns, (c) - 11 ns, (d) - 1 ns, (e) 9 ns, (f) 19 ns, (g) 29 ns, (h) 39 ns

阶段, 仍不断有物质汇聚于轴心处. 同时还可以看到进入滞止阶段, 轴心处的等离子体柱辐射变得更强, 这是因为大部分参与内爆的等离子体此时才停滞于轴心并辐射出 X 光. 这表明, X 光功率波形中的脚脉冲很可能来自于内爆过程中轴心处出现的等离子体柱.

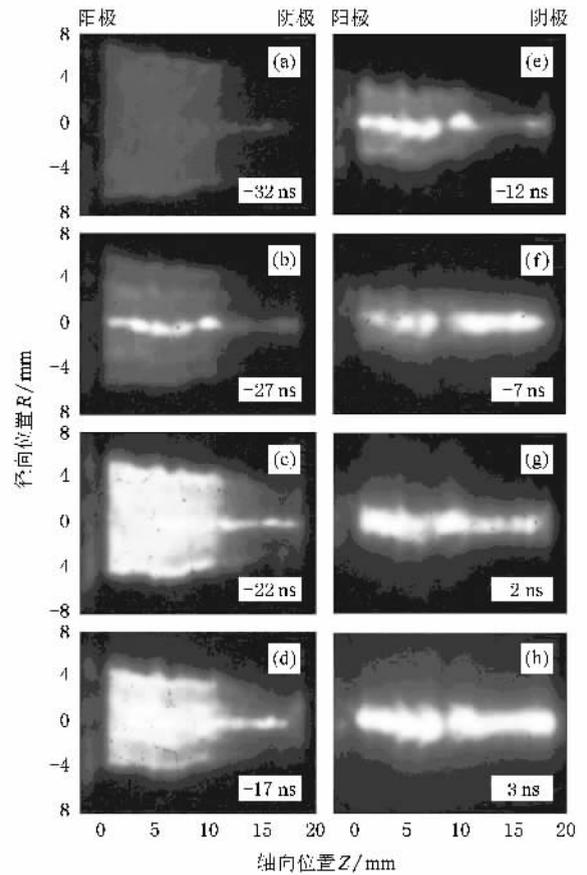


图6 发次 1025 的等离子体分幅像 (a) - 32 ns, (b) - 27 ns, (c) - 22 ns, (d) - 17 ns, (e) - 12 ns, (f) - 7 ns, (g) - 2 ns, (h) 3 ns

3.3. 等离子体径向收缩比

利用时空分辨或者时间积分的 X 光针孔像都可以对等离子体的径向收缩比进行估计. 径向收缩比定义^[16]为

$$C = R_0/R_{\min}, \quad (1)$$

式中 R_0 为等离子体壳层初始半径, R_{\min} 为内爆等离子体柱最小半径. 等离子体半径以 X 光辐射图像中强度的半高宽(FWHM)测量值为准, 并考虑了喷气负载初始位形中扩散角度的影响. 以图 4 中 1009 发次为例, 时空分辨的 X 光分幅像中测量的最小等离子体平均半径(由最接近 X 光功率峰值时刻的图像

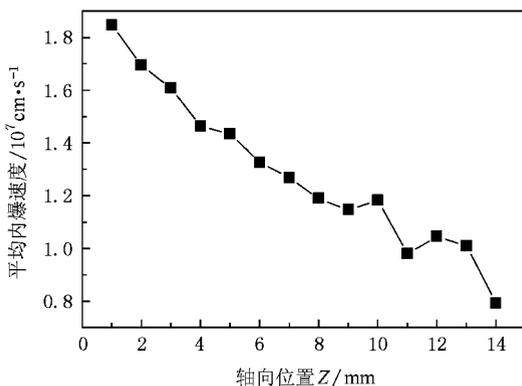


图5 轴向不同位置的等离子体平均内爆速度

端, 图 6(a) 拍摄于 X 光峰前 32 ns, 图 7(a) 拍摄于 X 光峰前 50 ns. 如前文图 2 中的 X 光功率波形所示, 在 X 光功率急剧上升前(即内爆等离子体进入滞止阶段前)存在一个较长的脚脉冲, 其幅值约为峰值功率的 10%. 而从图 6 和图 7 中可观察到的等离子体柱在内爆刚开始时就已存在, 并且在整个内爆加速

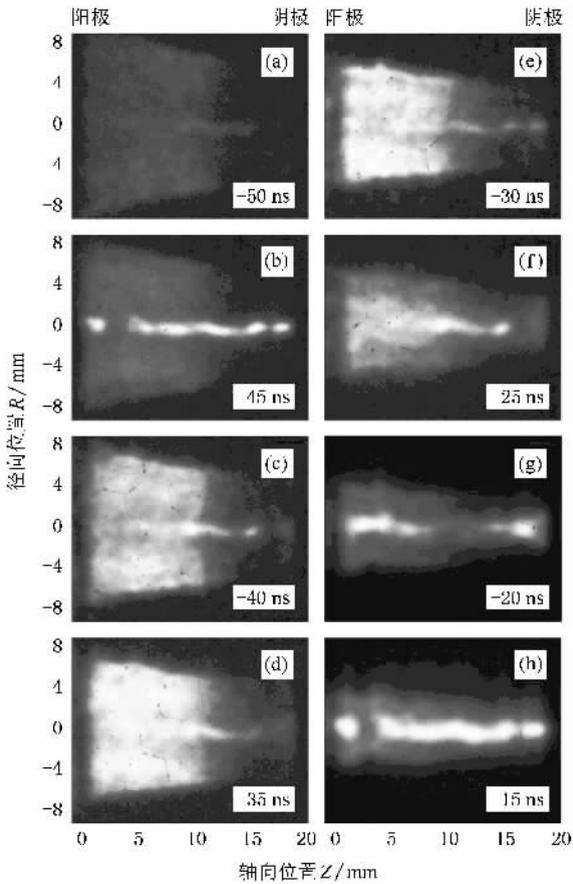


图 7 发次 1027 的等离子体分幅像 (a) - 50 ns, (b) - 45 ns, (c) - 40 ns, (d) - 35 ns, (e) - 30 ns, (f) - 25 ns, (g) - 20 ns, (h) - 15 ns

给出) 约为 0.75 mm, 径向收缩比约为 10—12; 利用 X 光针孔积分像(见图 8(a), 碳滤片)获得的等离子体柱平均半径约为 0.5 mm, 径向收缩比约为 15—18; 利用窄能带针孔积分相机(碳滤片 + 掠入射平面反射镜)得到的积分像(见图 8(b))获得的等离子体柱平均半径约为 0.45 mm, 径向收缩比约为 16—20. 上述结果表明, 各测量相机获得的等离子体径向收缩比存在差异, 这主要是由于各测试系统的能量响应范围存在差异所致.

3.4. 内爆轨迹和内爆质量

根据 X 光时空分辨图像可以获取等离子体的内爆轨迹, 如图 9 所示. 以图 3 和图 4 中分幅像为例测量了等离子体的内爆轨迹, 图中实心方格点为 1010 发次的 X 光分幅相机测量结果, 实心圆点为 1009 发次的结果, 所测数据均为阴极附近等离子体的外边界半径, 时间轴已用内爆时间 t_{imp} 进行了归

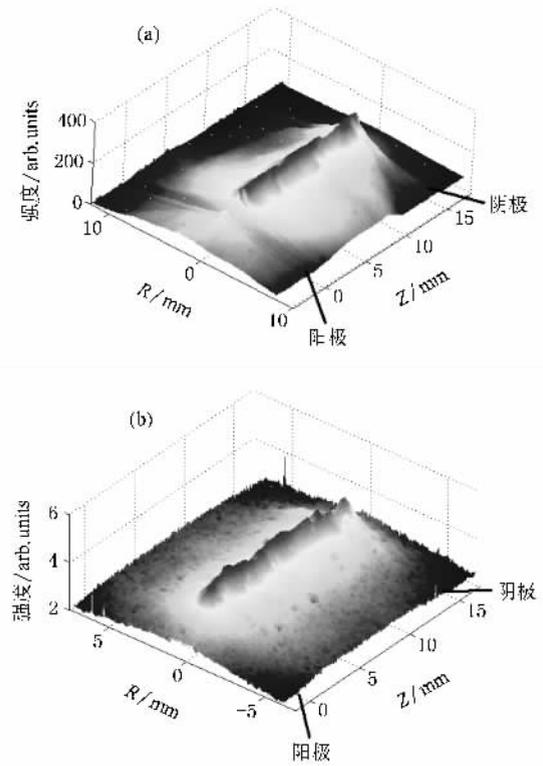


图 8 X 光针孔积分像和窄能带针孔积分像 (a) X 光针孔积分像(碳滤片)和(b)窄能带针孔积分像(碳滤片和平面反射镜)

一化.

图 9 中同时给出了利用雪耙模型计算的等离子体内爆轨迹. 适当的雪耙模型应考虑径向密度分布^[16,17], 其方程为

$$m(t) \frac{d^2 R}{dt^2} - 2\pi R \rho \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = - \frac{\mu_0 I^2(t)}{4\pi R}, \quad (2)$$

$$\frac{dm(t)}{dt} = - 2\pi R \rho(R) \frac{dR}{dt}, \quad (3)$$

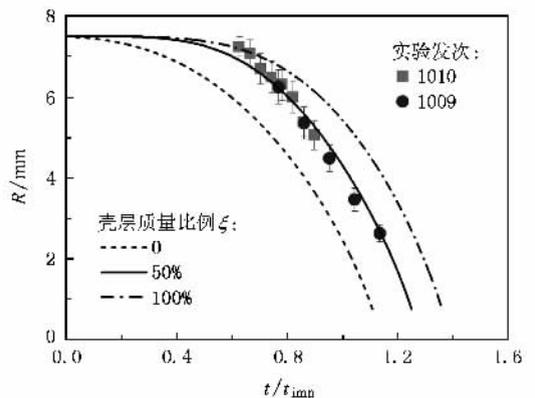


图 9 由 X 光分幅像获得的等离子体壳层内爆轨迹与雪耙模型计算结果

式中, $m(t)$ 代表雪耙模型中扫集到壳层中的质量, $\rho(R)$ 为负载初始质量的径向密度分布. 为简单起见, 我们假设初始等离子体有一部分质量集中在壳层上, 而其余质量均布在壳层以内的圆柱中, 并且壳层质量占总质量的比重为 ξ , 因此对应的雪耙模型方程为

$$m \frac{d}{dt} \left\{ \left[1 - (1 - \xi) \frac{R^2}{R_0^2} \right] \frac{dR}{dt} \right\} = - \frac{\mu_0 I^2(t)}{4\pi R}, \quad (4)$$

式中, $I(t)$ 为脉冲电流, 由实验给出; R_0 为内爆等离子体壳层的初始半径; m 表示负载线质量密度, 此处采用 1 号喷嘴数值计算结果 $43 \mu\text{g}/\text{cm}$ 作为对线质量密度的估计. ξ 分别取为 0, 50% 和 100%, 由(4)式得到的计算结果如图 9 所示.

图 9 中实验获取的内爆轨迹与雪耙模型计算结果相比较, 当 $\xi = 0$, 即假定所有的质量均匀分布在等离子体圆柱内时, 计算结果与实验并不相符; 取 $\xi = 100\%$, 所有质量均集中在壳层上, 此即薄壳模型, 此时的计算结果也与实验相差较大; 当 $\xi = 50\%$ 时, 壳层质量约占到初始质量的 50%, 此时雪耙模型给出的内爆轨迹与实验结果符合得较好.

3.5. 等离子体不稳定性

实验中还观察到内爆过程中出现等离子体不稳定性现象. 如图 4 所示, 在 X 光峰值前, 距离 X 光峰值越近, 磁流体瑞利-泰勒 (MRT) 不稳定性越显著, 并且随着轴向位置的不同其发展过程也存在差异. 由于靠近阳极端的等离子体内爆速度更快, 与阴极端相比, 其 MRT 不稳定性更显著; 内爆加速后期, 阴极端的 MRT 不稳定性也快速发展起来. 在接近 X 光峰值时刻, MRT 不稳定性整体上达到最大的增长 (见图 4(d)). 在 X 光峰值之后, 未观察到明显的

MRT 不稳定性现象, 但此时 $m = 0$ 腊肠不稳定性开始迅速增长并占主导地位 (见图 4(e)), 当其增长到一定程度, 等离子体柱局部位置出现断裂 (见图 4(e)(f)). 另外, 从图 4(f) 中还可以观察到等离子体达到最大压缩后, $m = 1$ 扭曲不稳定性也有略微的发展, 且随着时间的推移, $m = 1$ 扭曲不稳定性急剧增长也导致等离子体柱局部断裂并开始崩溃.

4. 结 论

本文利用“阳”加速器装置上开展的单壳层喷氦气负载 Z 箍缩实验结果对等离子体内爆特性进行了初步研究. 结果表明: 1) 单壳层喷气 Z 箍缩内爆加速阶段占总内爆时间的比例约为 40%—50%; 2) 等离子体初期“喇叭”状位形结构与喷气负载流场的数值模拟结果基本一致, 内爆加速过程中等离子体靠近阳极一端的辐射强度明显强于阴极; 3) 沿轴向内爆速度存在的差异抑制了“拉链”效应, 提高了内爆等离子体滞止的同步性; 4) 不同能量响应范围的针孔相机获得的等离子体径向收缩比存在差异; 5) 对 X 光分幅像获取的等离子体的内爆轨迹与雪耙模型计算结果进行了比较分析; 6) 观察到了 MRT 不稳定性、 $m = 0$ 型和 $m = 1$ 型不稳定性, 并对各自发展过程进行了分析.

在本文的单壳层喷气 Z 箍缩实验中, 存在着喷气负载的线质量密度不确定, 气流位形不够优化, 缺少轴向诊断数据等不足之处. 下一阶段的实验我们将进一步优化负载参数, 增加诊断种类并提高测试精度, 以利于 Z 箍缩物理现象的深入分析.

感谢中国工程物理研究院流体物理研究所 108 室负责运行“阳”加速器的全体同志在实验中提供的帮助.

[1] Sanford T W L, Allhouse G O, Marder B M, Nash T J, Mock R C, Spielman R B, Seamen J F, McGurn J S, Jobe D, Gilliland T L, Vargas M, Struve K W, Stygar W A, Douglas M R, Matzen M K, Hammer J H, de Groot J S, Eddleman J L, Peterson D L, Mosher D, Whitney K G, Thornhill J W, Pulsifer P E, Apruzese J P, Maron J 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 5063

[2] Matzen M K 1997 *Phys. Plasmas* **4** 1519

[3] Velikovich A L, Clark R W, Davis J, Chong Y K, Deeney C, Coverdale C A, Ruiz C L, Cooper G W, Nelson A J 2007 *Phys. Plasmas* **14** 022701

[4] Spielman R B, Deeney C, Chandler G A, Douglas M R, Fehl D L, Matzen M K, McDaniel D H, Nash T J, Porter J L, Sanford T W L, Seamen J F, Stygar W A, Struve K W, Breeze S P, McGurn J S, Torres J A, Zagar D M, Gilliland T L, Jobe D O, McKenney J L, Mock R C, Vargas M, Wagoner T, Peterson D L 1998 *Phys. Plasmas* **5** 2105

[5] Deeney C, Douglas M R, Spielman R B, Nash T J, Peterson D L, Eplattner P L, Chandler G A, Seamen J F, Struve K W 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4883

[6] Sze H, Coleman P L, Banister J, Failor B H, Fisher A, Levine J S,

- Song Y ,Waisman E M ,Apruzese J P ,Clark R W ,Davis J ,Mosher D ,Thornhill J W ,Velikovich A L ,Weber B V ,Coverdale C A ,Deeney C ,Gilliland T L ,McGum J ,Spielman R B ,Struve K W ,Stygar W A ,Bell D 2001 *Phys. Plasmas* **8** 3135
- [7] Qiu A C ,Kuai B ,Zeng Z Z ,Wang W S ,Qiu M T ,Wang L P ,Cong P T ,Li M 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5917 (in Chinese) [邱爱慈、蒯斌、曾正中、王文生、邱孟通、王亮平、丛培天、吕敏 2006 物理学报 **55** 5917]
- [8] Huang X B ,Yang L B ,Gu Y C ,Deng J J ,Zhou R G ,Zou J ,Zhou S T ,Zhang S Q ,Chen G H ,Chang L H ,Li F P ,Ouyang K ,Li J ,Yang L ,Wang X ,Zhang Z H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1900 (in Chinese) [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 2006 物理学报 **55** 1900]
- [9] Ning C ,Ding N ,Yang Z H 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 338 (in Chinese) [宁成、丁宁、杨震华 2007 物理学报 **56** 338]
- [10] Ding N ,Yang Z H ,Ning C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 808 (in Chinese) [丁宁、杨震华、宁成 2004 物理学报 **53** 808]
- [11] Ning C ,Yang Z H ,Ding N 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1650 (in Chinese) [宁成、杨震华、丁宁 2003 物理学报 **52** 1650]
- [12] Ding N ,Zhang Y ,Ning C ,Shu X J ,Xiao D L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3027 (in Chinese) [丁宁、张扬、宁成、束小建、肖德龙 2008 物理学报 **57** 3027]
- [13] Guo Y J ,Li Z H ,Li Z Q 2004 *Acta Aerodynam. Sin.* **22** 389 (in Chinese) [国义军、李中华、李震乾 2004 空气动力学学报 **22** 389]
- [14] Cuneo M E ,Waisman E M ,Lebedev S V ,Chittenden J P ,Stygar W A ,Chandler G A ,Vesey R A ,Yu E P ,Nash T J ,Bliss D E ,Sarkisov G S ,Wagoner T C ,Bennett G R ,Sinars D B ,Porter J L ,Simpson W W ,Ruggles L E ,Wenger D F ,Garasi C J ,Oliver B V ,Aragon R A ,Fowler W E ,Hetttrick M C ,Idzorek G C ,Johnson D ,Keller K ,Lazier S E ,McGum J S ,Mehlhorn T A ,Moore T ,Nielsen D S ,Pyle J ,Speas S ,Struve K W ,Torres J A 2005 *Phys. Rev. E* **71** 046406
- [15] Kubes P ,Kolacek K ,Krejci A ,Kravarik J ,Paduch M ,Tomaszewski K 1998 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **26** 1113
- [16] Ryutov D D ,Derzon M S ,Matzen M K 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 167
- [17] Lebedev S V ,Beg F N ,Bland S N ,Chittenden J P ,Dangor A E ,Haines M G ,Kwek K H ,Pikuz S A ,Shelkovenko T A 2001 *Phys. Plasmas* **8** 3734

Implosion characteristics of gas-puff Z-pinch with a single-shell nozzle^{*}

Ren Xiao-Dong[†] Huang Xian-Bin Zhou Shao-Tong Zhang Si-Qun Li Jing Yang Li-Bing Li Ping

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

(Received 17 December 2008 ; revised manuscript received 26 March 2009)

Abstract

Single-shell gas-puff Z-pinch experiments were performed on “ Yang ” accelerator (peak current 500—850 kA , rise time ~ 85 ns). The x-ray power and yield , the time-resolved and time-integrated images of plasma implosions were measured. Based on the corresponding diagnostics , the implosion time was defined and the implosion process was divided into four stages. the initial plasma status and the distribution of radiative intensity were studied. In addition , the implosion trajectories , load mass , radial convergence and magneto- Rayleigh-Taylor (MRT) instability were analyzed.

Keywords : gas-puff Z-pinch , plasma implosion , x-ray power , “ Yang ” accelerator

PACC : 5255E , 5255D , 5250L

^{*} Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10635050).

[†] E-mail : amosrd@ yahoo. cn