

单层丝阵负载 Z 箍缩内爆辐射特性研究^{*}

夏广新[†] 章法强 许泽平 徐荣昆 陈进川 宁家敏

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2009 年 6 月 20 日收到, 2009 年 8 月 27 日收到修改稿)

在电流 3—4 MA 的 Angara-5-1 脉冲装置上进行了单层钨丝阵 Z 箍缩实验, 利用具有坪响应的 X 射线功率谱仪获得 X 射线功率, 利用 X 射线纳秒分幅相机获得等离子体内爆辐射区图像. 在丝阵直径相同时, 实验得到较细的丝直径使得内爆较早, 收缩比较大. 较大的丝间隙使得内爆早期丝间等离子体不能有效的融合, 而是较孤立的等离子体簇向内箍缩. 较大的丝直径和丝间隙导致不稳定性波长较大. 在丝阵直径不同, 丝直径相当时, 实验得到较大的丝阵直径内爆启动较早, 具有较大的内爆速度, 但等离子体在内爆过程中较分散. 另外, 较大的丝直径和丝阵直径使 X 射线辐射脉冲时间较宽.

关键词: 单层丝阵, Z 箍缩, 内爆

PACC: 0532, 0536

1. 引言

由于 Z 箍缩 (Z-pinch) 技术可以产生实验室强 X 射线源, 甚至有可能实现核聚变点火, 而受到人们极大的关注. 在 Z 箍缩负载选择中, 近年来金属丝阵负载受到科学家们前所未有的青睐, 利用这种金属丝阵负载可以获得很高的 X 射线功率、X 射线总能量及很窄的 X 射线脉冲. 在 Z 装置上, 由直径 $7.5\ \mu\text{m}$ 高 2 cm 的 240 根钨丝组成丝阵直径 4 cm 的单层柱形钨丝阵负载, 辐射 X 射线功率近 200 TW, 辐射的 X 射线总能量达 $1.7\ \text{MJ}$ ^[1]. 但丝阵负载早期等离子体形成的过程及等离子体内爆过程中存在的磁场驱动的 Rayleigh-Taylor (RT) 不稳定性, 直接影响了 X 射线辐射参数. 英国帝国理工学院 Blackett 实验室^[2,3] 和美国 Cornell 大学等离子体研究实验室等都做了很多单丝、多丝实验^[4-9], 提出了单丝形成等离子体的早期具有“芯-晕”结构和金属丝会形成高密度膨胀芯结构等结论, 使人们更好的理解了单丝及丝阵负载早期等离子体的形成过程. 后来, Deeney 等人也在 Z 装置上借助文献 [1] 这种丝阵, 又在内层加入 120 根同样的丝组成的丝阵, 形成双层丝阵负载, 其辐射功率提高到了 280 TW, 辐射的 X 射线总能量基本不变^[10]. 双层丝阵负载实验的结果证明由于内层

丝阵的引入, 有效减缓了丝阵内爆过程的 RT 不稳定性, 提高了 X 射线辐射的参数^[11-13]. 国内这方面的研究由于起步较晚, 对丝阵负载早期汽化、等离子体形成及 RT 不稳定性发展的认识还有待进一步的提高^[14-16], 为此在 3—4 MA 装置上开展了一系列单、双层丝阵负载实验, 借助单层丝阵负载实验的早期认识单丝汽化、等离子体形成及早期不稳定性发展具有重要意义, 并对双层丝阵负载的制备和实验具有指导意义.

本文对 3—4 MA 装置上进行的单层钨丝阵负载实验数据进行分析, 获得了些特定负载参数时的物理结果和物理规律, 并提出今后负载参数优化的建议.

2. 实验条件及图像处理方法

实验在 Angara-5-1 装置上进行, 该装置由八个脉冲功率模块并联构成, 模块间隙和顶部区域为实验诊断空间. Angara-5-1 装置运行的主要参数为: 负载电流 3—4 MA; 电流脉冲前沿 70 ns; 有效驱动的线质量约 $300\ \mu\text{g}/\text{cm}$. 装置的八个水平测试通道见图 1. 图 1(a) 为水平测试通道俯视图, 分幅相机在 3 号通道, X 射线功率谱仪在 7 号通道, 详细见图 1(b).

X 射线功率由基于闪烁体与光电管组合的在

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10635050)资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: xgxlg@sohu.com

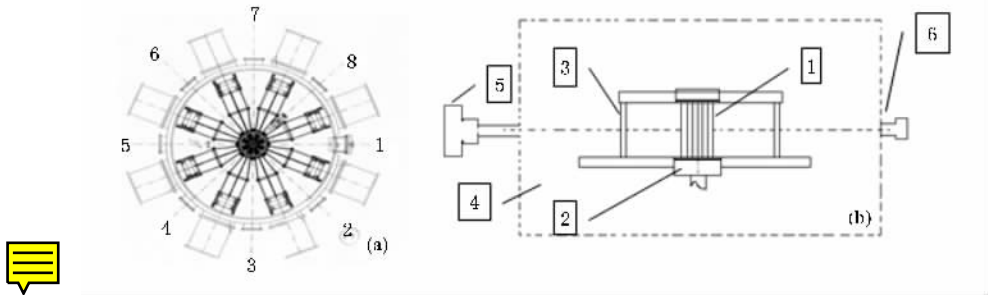


图 1 现场测量通道及测量示意图(标注 1 为金属丝阵 2 为丝阵阴极 3 为回流柱 4 为真空靶室 5 为纳秒分幅相机 6 为 X 射线功率谱仪)(a)测量通道俯视图;(b)X 射线功率、分幅像测量示意图

50 eV—1.2 keV 能量范围内响应的功率谱仪获得,早期不稳定性及箍缩阶段 X 射线辐射图像主要由十分幅纳秒 X 射线分幅相机获得.在美国圣地亚 Saturn 装置及英国的 MAGPIE 装置上均配置有软 X 射线分幅相机^[17,18],X 射线纳秒分幅相机可有效获得丝阵内爆过程中的等离子体辐射信息.工作原理是利用针孔阵列将辐射区的图像分别成在分幅相机的十条金阴极上,在特定的拍摄时段由纳秒脉冲序列依次将图像选通输出到分幅相机屏上,再由后端紧贴 CCD 记录图像.分幅相机能谱范围 100 eV—10 keV,空间分辨约 300 μm ,选通脉冲及脉冲输出时间一致性较好,在拍摄阶段获得系列曝光时间 1.5 ns 的 X 射线辐射图像,各幅图像有效、可比.实验用单层钨丝阵负载是丝阵直径 12 mm 和 18 mm 两种,详细参数见表 1.

表 1 实验使用的单层钨丝阵负载参数

丝阵直径 /mm	丝阵高 /mm	丝直径 / μm	丝根数	丝间隙 /mm	丝阵线质量 ($\mu\text{g}/\text{cm}$)
12	15	5.0	90	0.42	340.6
12	15	6.0	60	0.63	327.0
12	15	8.0	40	0.94	387.5
18	15	4.2	128	0.44	341.8

图像处理过程是:选取图像,将图像去除噪声,在图像中沿负载轴向方向积分,得到图像的波形,用波形的半高宽表示 X 射线辐射区的径向宽度,再将成像比例系数代入,即得到负载区的 X 射线辐射区宽度.

文中所提的内爆轨迹指将获得的纳秒 X 射线辐射图像按上述方法处理后将波形的半高宽值连线即 X 射线辐射区域边界的轨迹.

3. 实验结果及分析

在丝阵负载直径 12 mm,丝直径 6.0 μm 和 8.0 μm 时,从图 2 上可见在 X 射线峰前 31 ns 和 36.8 ns 时,丝阵负载放电后形成较明显的 X 射线辐射通道,没看见丝间融合现象,而是较孤立的等离子体簇向内箍缩;丝阵负载直径 12 mm 时,8.0 μm 丝直径较 6.0 μm 丝直径的 X 射线辐射通道不均匀并带有一定的扭曲.

从图 3 上可见,丝阵直径 12 mm,丝直径 6.0 μm 的丝阵负载在 X 射线峰前 11 ns 时不稳定性波长约 0.7 mm,X 射线峰前 1 ns 时发展为约 1.3 mm;而丝阵直径 12 mm,丝直径 8.0 μm 的丝阵负载在 X 射线

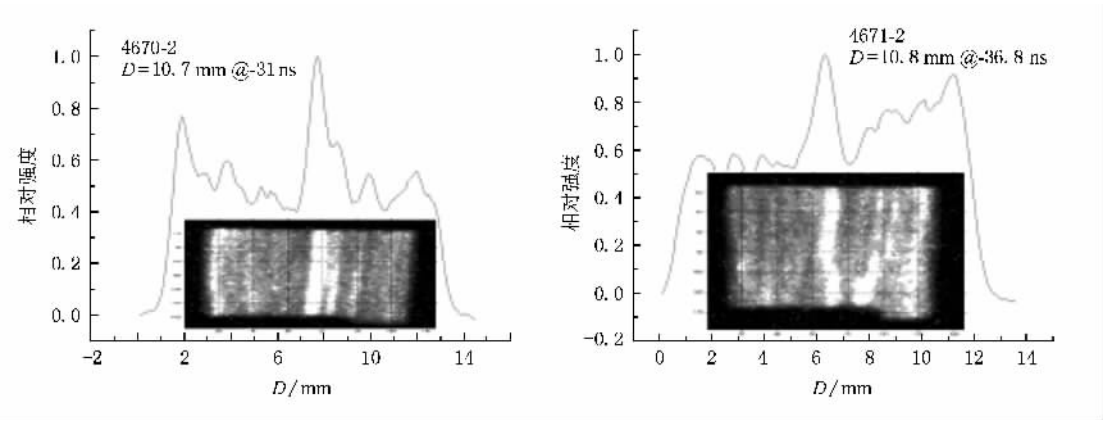


图 2 丝直径 6.0 μm 的 4670 发和 8.0 μm 的 4671 发的早期 X 射线纳秒分幅像

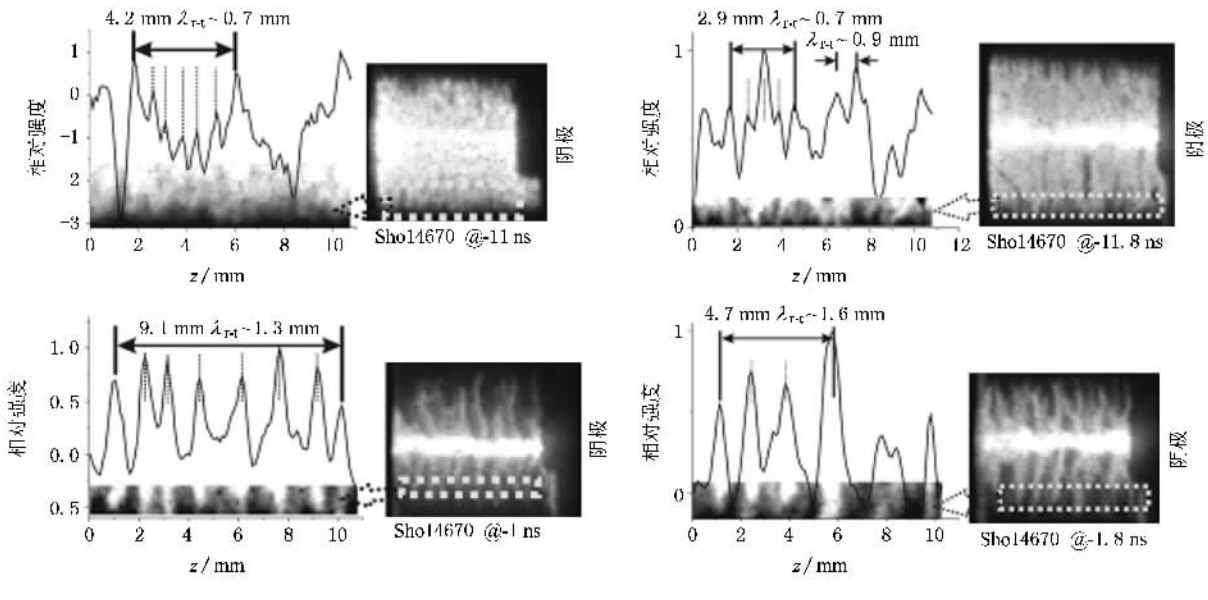


图3 4670 发 X 射线峰前 11 ns 到 1 ns 与 4671 发 X 射线峰前 11.8 ns 到 1.8 ns 的不稳定性波长比较

峰前 11.8 ns 时不稳定性波长约 0.8 mm,X 射线峰前 1.8 ns 时却发展为约 1.6 mm.较粗的丝及较大的丝间隙带来了较长的不稳定性波长和较快的不稳定性幅度发展.

丝阵直径 12 mm 而丝直径为 5 μm 6 μm 和 8 μm 的丝阵负载时,负载内爆轨迹比较见图 4.由于实验原因,图 4 上的丝直径 6 μm 和 8 μm 数据分别只有一发次有效数据,从本数据看丝直径 6 μm 和 8 μm 时内爆过程略晚于丝直径 5 μm 的丝阵,且丝直径为 6 μm 时的丝阵负载线质量最小,其收缩比仅有 4.3,小于丝直径 5 μm 丝阵负载的收缩比 5.7,但这种结论还需要进一步的实验加以证明.

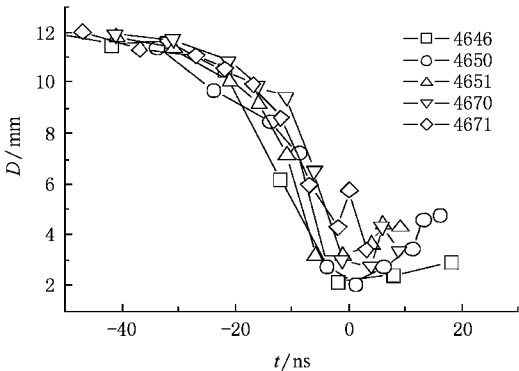


图4 丝阵直径相同丝直径不同的内爆轨迹比较

丝阵直径分别为 12 mm 和 18 mm 的丝阵负载时的内爆轨迹如图 5 所示.由该图可见,两种丝阵负载内爆轨迹有较明显差别.丝阵直径 18 mm 的丝阵负

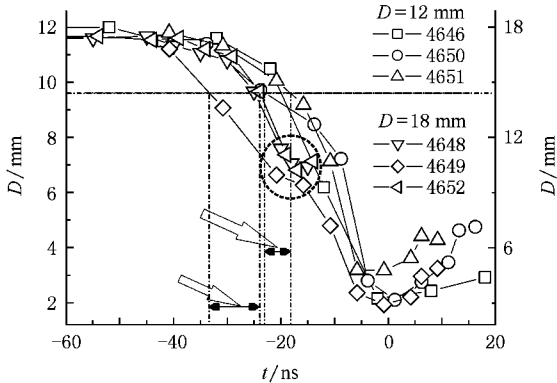


图5 12 mm 和 18 mm 直径单层丝阵内爆轨迹比较

载内爆启动早,例如,丝阵直径 18 mm 的丝阵负载等离子体的径向边界在 X 射线峰前 24—33 ns 即达到 14.4 mm(直径的 80%).而 6—10 ns 之后丝阵直径 12 mm 的丝阵负载等离子体径向边界才达到 9.6 mm(直径的 80%).虽然大直径丝阵负载内爆启动较早,但在 X 射线峰前 18 ns 附近,径向直径约 9—10 mm 时内爆速度明显减慢,甚至停止,如图中虚线圆圈标示.两种丝阵负载基本在 X 射线峰值时刻同时达到箍缩最紧状态,但相比较而言,丝阵直径 18 mm 的丝阵负载箍缩更紧,收缩比 6.2,较丝阵直径 12 mm 的丝阵负载收缩比 5.7 更大.这表明大直径丝阵负载的内爆过程中有更多的能量被用来压缩等离子体,而且存在明显分段压缩过程.

丝阵直径分别为 18 mm 和 12 mm 的丝阵负载在内爆阶段不同时刻的径向辐射区宽度变化如表 2 所

示(表中所指辐射区宽度为分幅相机获得图像沿轴向积分所得).由表可见,在X射线峰值时刻以前,4649发次(丝阵直径18 mm)中X射线径向辐射1/4高宽和1/8高宽与半高宽的比值均高(或相近)于

4651发次(丝阵直径12 mm)中的相应值,而在X射线峰后却相反.这表明大直径丝阵负载等离子体在内爆到心阶段等离子体分布相对分散,而在X射线峰后却相对集中.

表2 4649和4651发次X射线径向辐射宽度变化

发次	宽度/mm (-20.8ns)	宽度/mm (-15.8ns)	宽度/mm (-10.8ns)	宽度/mm (-5.8ns)	宽度/mm (-0.8ns)	宽度/mm (+4.2ns)	宽度/mm (+6.2ns)	宽度/mm (+9.2ns)
4649	9.9	9.1	6.6	3.5	2.8	3.3	4.4	4.8
1/2	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)
	12.0	10.6	8.1	8.9	6.7	5.3	6.6	6.6
1/4	(121%)	(116%)	(124%)	(257%)	(236%)	(163%)	(150%)	(138%)
	13.2	12	9.6	11.9	9.2	7.1	8.9	8.7
1/8	(133%)	(133%)	(147%)	(343%)	(326%)	(218%)	(202%)	(181%)
4651	10.1	9.2	7.1	3.1	3.0	3.6	4.1	4.1
1/2	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)	(100%)
	10.9	10.5	9.0	7.8	6.1	5.8	8.2	7.9
1/4	(109%)	(114%)	(127%)	(253%)	(207%)	(162%)	(200%)	(193%)
	11.5	11.3	10.1	11.0	9.1	8.1	11.3	11.0
1/8	(114%)	(123%)	(143%)	(354%)	(307%)	(225%)	(273%)	(267%)

图6为单层丝阵负载平均内爆速度比较.由图可见,大丝阵直径的单层丝阵负载在X射线峰前约22 ns时速度已达到 3.5×10^7 cm/s,约5 ns后速度降低至 2×10^7 cm/s,并在X射线峰前5—10 ns时再次达到 3.5×10^7 cm/s.小丝阵直径的单层丝阵负载在X射线峰前约20 ns时平均内爆速度达到 1×10^7 cm/s,随后在X射线峰前5—10 ns时达到最大平均速度 4.4×10^7 cm/s.丝直径为8 μ m的丝阵负载其线质量最大,其在X射线峰前的最大内爆速度仅为 2.6×10^7 cm/s,为各种丝阵中最小.

在四种单层钨丝阵中,其X射线辐射功率和总能量如表3所示.从表中可见丝阵直径12 mm,丝直径6 μ m和8 μ m时,其负载电流峰值均比丝直径5 μ m时大,但其辐射的X射线功率峰值及辐射总能量均较低,且X射线脉冲的半高宽较宽;而同样丝

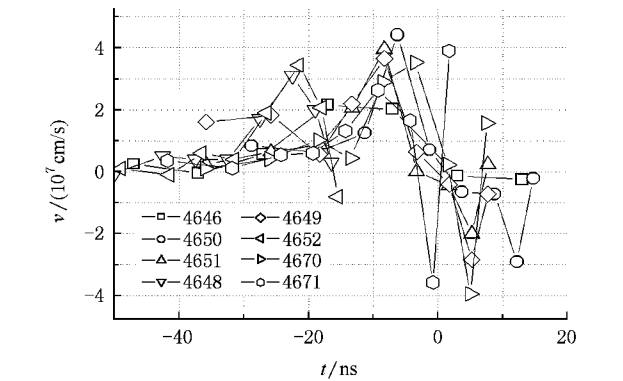


图6 单层丝阵平均内爆速度比较

阵直径,丝直径5.0 μ m时,其X射线辐射功率峰值却达到4.35 TW.丝阵直径18 mm,丝直径4.2 μ m时,带来了较大的负载电流(依据Z-pinch内爆动力

表3 X射线功率辐射参数

炮号	丝阵直径/ mm	丝直径/ μ m	负载电流/ MA	X射线功率峰值/ TW	X射线脉冲宽度/ ns	X射线辐射总能量/ kJ
4650	12	5.0	3.6	4.35	7.4	102.88
4651	12	5.0	3.5	4.37	18.74	125.04
4670	12	6.0	3.86	2.94	13.17	76.86
4671	12	8.0	3.62	2.61	17.15	75.86
4648	18	4.2	4.0	4.84	8.42	90.1
4649	18	4.2	3.2	3.87	13.2	106
4652	18	4.2	4.4	5.15	15.3	122.46

学薄壳理论模型,与丝阵等离子体内爆状态相关的箍缩常数表示为 $C = 10^{-2} I_{\max}^2 t_{\text{up}}^2 / m r_i^2$, 式中的丝阵线质量 m , 丝阵初始半径 r_i , 负载电流峰值 $I_{\max}$, 电流上升时间 t_{up} . 显然在电流上升时间和丝阵线质量相当的情况下, 箍缩常数 C 一定, 较大的丝阵初始半径带来较大的负载电流峰值^[19-20], X 射线辐射功率较高达到 5.15 TW, 但是 X 射线脉冲的半高宽未见明显变窄.

4. 结 论

通过本次的单层钨丝阵实验发现: 丝阵直径 12 mm 时, 较大的丝间隙使得内爆早期丝间无法形成有效的等离子体融合, 而是较孤立的等离子体簇向内箍缩运动, 较大的丝直径和丝间隙带来较长的不

稳定性波长及其幅度发展, 使得“种子”不稳定性加强, 不利于等离子体内爆, 较小的丝直径带来较大的收缩比和较早的丝阵内爆. 丝阵直径 12 mm 和 18 mm 时, 较大的丝阵直径, 使得等离子体向内箍缩过程中较分散, 从而影响内爆后期等离子体的同步箍缩, 使得 X 射线辐射脉冲的半宽增大; 但较大的丝阵直径带来较大的负载电流和内爆速度, 使得收缩比更大, 更多的能量参与内爆压缩.

在合适的丝阵线质量情况下, 较小的丝直径(要保证丝的均匀性)及适中的丝阵直径, 能获得较好的内爆箍缩, 且丝阵直径对内爆 X 射线功率的提高具有重要意义, 好的内爆同步性带来较高的 X 射线辐射功率和较短的 X 射线辐射脉冲时间.

本论文的工作得到研究组内同事的大力支持, 在此一并表示感谢.

- [1] Spielman R B, Deeney C, Chandler G A, Douglas M R, Fehi 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 1998 *Phys. Plasmas* **5** 2105
- [2] Lebedev S V, Mitchell I H, Aliaga-Rossel R, Bland S N, Chittenden J P, Dangor A E, Haines M G 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4152
- [3] Lebedev S V, Beg F N, Bland S N, Chittenden J P, Dangor A E, Haines M G, Pikuz S A, Shelkovenko T A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 98
- [4] Shelkovenko T A, Pikuz S A, Mingaleev A R, Hammer D A 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 667
- [5] Pikuz S A, Shelkovenko T A, Mingaleev A R, Hammer D A, Neves H P 1999 *Phys. Plasmas* **6** 4272
- [6] Pikuz S A, Shelkovenko T A, Sinars D B, Greenly J B, Dimant Y S, Hammer D A 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4313
- [7] Sinars D B, Shelkovenko T A, Pikuz S A, Hu M, Romanova V M, Chandler K M, Greenly J B, Hammer D A, Kusse B R 2000 *Phys. Plasmas* **7** 429
- [8] Sinars D B, Shelkovenko T A, Pikuz S A, Greenly J B, Hammer D A 2000 *Phys. Plasmas* **7** 1555
- [9] Sinars D B, Hu Min, Chandler K M, Shelkovenko T A, Pikuz S A, Greenly J B, Hammer D A, Kusse B R 2001 *Phys. Plasmas* **8** 216
- [10] Deeney C, Douglas M R, Spielman R B, Nash T J, Peterson D L, Eplattienier P L, Chandler G A 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4883
- [11] Gribovsky E V, Lukajishiwuli G G, Mntelof G N, Alenik G M, Fulalof Y N, Kasalaf B W 2006 *Phys. Plasmas* **32** 33
- [12] Ding N, Liu Q, Ning C, Yang Z H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3488 (in Chinese) [丁宁、刘全、宁成、杨振华 2006 物理学报 **55** 3488]
- [13] Ding N, Zhang Y, Liu Q, Xiao D L, Shu X J, Ning C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1083 (in Chinese) [丁宁、张扬、刘全、肖德龙、束小建、宁成 2009 物理学报 **58** 1083]
- [14] Yang Z H, Liu Q, Ding N, Ning C 2005 *High Power Laser and Particle Beams* **17** 1533 (in Chinese) [杨振华、刘全、丁宁、宁成 2005 强激光与粒子束 **17** 1533]
- [15] Duan Y Y, Guo Y H, Qiu A C, Wang W S 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2654 (in Chinese) [段耀勇、郭永辉、邱爱慈、王文生 2004 物理学报 **53** 2654]
- [16] Ding N, Ning C, Yang Z H 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 808 (in Chinese) [丁宁、宁成、杨振华 2004 物理学报 **53** 808]
- [17] Sanford T W L, Mock R C, Spielman R B, Peterson D L, Mosher D, Roderick N F 1998 *Phys. Plasmas* **5** 3737
- [18] Aliaga-Rossel R, Lebedev S V, Chittenden J P, Mitchell I H, Saavedra R, Dangor A E, Haines M G 1998 *I EEE Trans Plasma Sci.* **26** 1101
- [19] Qiu A C, Kuai B, Zeng Z Z, Wang W S, Qiu M T, Wang L P, Cong P T, Lv 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]
- [20] Ding N, Ning C, Su X J, Xiao D L, Zhang Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 39319 (in Chinese) [丁宁、宁成、束小建、肖德龙、张扬 2008 物理学报 **57** 39319]

Radiation characteristics of single wire array Z-pinch implosion^{*}

Xia Guang-Xin[†] Zhang Fa-Qiang Xu Ze-Ping Xu Rong-Kun Chen Jin-Chuan Ning Jia-Min

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

(Received 20 June 2009 ; revised manuscript received 27 August 2009)

Abstract

Single wire array Z-pinch experiments were carried out on the 3—4 MA Angara-5-1 facility employing a set of diagnostic equipment, including an X-ray power meter with platform response to record X-ray emission bursts and a time resolved pinhole camera to obtain soft X-ray images. Experimental results indicated that when the diameter of wire array was fixed, implosions of arrays with smaller wire diameter started earlier and had a larger convergence ratio. In addition, when the wire gap was larger, the wire plasma could not merge effectively but moved inward individually at an early imploding stage, and larger wire diameter with larger wire gap had longer instability wavelength. The results also showed that when the wire diameter was fixed, implosions of arrays with larger diameter started earlier and had higher implosion speeds and wider plasma dispersion during implosions. Implosions of arrays with larger wire and array diameter had longer pulse X-ray width.

Keywords : single wire array, Z-pinch, implosion

PACC : 0532, 0536

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

[†] Corresponding author. E-mail : xgxlg@sohu.com