

“强光一号”Al 丝阵 Z 箍缩产生 K 层辐射实验研究*

吴 刚^{1,2)} 邱爱慈²⁾ 吕 敏¹⁾ 蒯 斌²⁾ 王亮平²⁾ 丛培天²⁾ 邱孟通²⁾
雷天时²⁾ 孙铁平²⁾ 郭 宁²⁾ 韩娟娟²⁾ 张信军²⁾ 黄 涛²⁾ 张国伟²⁾ 乔开来²⁾

1) 清华大学工程物理系, 北京 100084)

2) 西北核技术研究所, 西安 710024)

(2008 年 8 月 25 日收到, 2008 年 10 月 17 日收到修改稿)

在“强光一号”加速器开展了 Al 丝阵 Z 箍缩产生 K 层辐射的实验研究, 固定 Al 丝线径 20 μm 、丝阵直径 12 mm, 丝根数为 8 和 12 的负载获得 K 层产额分别为 0.9 kJ/cm 和 1.1 kJ/cm, 明显高于 16 和 24 根丝负载. 辐射功率波形和时间分辨的 X 射线图像显示, 低丝数负载存在拖尾质量引起的多次内爆现象. 在 60%—80% 的内爆时间内, 丝阵几乎停留在初始位置, 主体内爆在随后的 25—30 ns 内完成, 将部分等离子体留在初始位置, 形成质量的拖尾分布. 内爆后期驱动电流向外围的拖尾质量迁移, 引发二次乃至三次内爆, 后续内爆对 K 层辐射也有相当贡献. 拖尾质量的出现与单丝等离子体上形成的轴向调制结构及不均匀性的发展有关.

关键词: Al 丝阵, Z 箍缩, K 层辐射, 拖尾质量

PACC: 5225P, 5230

1. 引 言

利用中低 Z 元素负载的 K 壳层辐射获得 1—10 keV 的强脉冲 X 射线源^[1-8], 是 Z-pinch (Z 箍缩) 等离子体辐射源除驱动惯性约束聚变靶丸点火之外的一个主要应用需求. 通过磁压驱动内爆和轴线滞止, 等离子体负载被加热到电子温度 $T_e \sim 10^2$ — 10^3 eV, 足以将离子剥离到 K 壳层, 即形成类 H 和类 He 离子, 并激发出 $1s-np$ 和 $1s np-1s^2$ 的线辐射、复合到 K 壳层的双电子激发伴线和自由-束缚 (f-b) 跃迁产生的复合辐射连续谱线. 常用负载材料有 Ne (~ 1.0 keV), Al (~ 1.7 keV), Ar (~ 3 keV), Ti (~ 4.8 keV), Fe (~ 6.7 keV), Ni (~ 8 keV) 等. Z-pinch 等离子体辐射源的能量转换效率高, 初始电能转换为 1—3 keV X 射线的效率可达 2%—5%.

定标研究^[1,4]表明, K 层辐射产额 Y_K 主要依赖于负载驱动电流的大小, 当驱动电流幅值 I_0 小于某临界值 I_{BP} 时, Y_K 正比于 I_0^4 , 称之为“低效率”区域; 当 I_0 增大到 I_{BP} 以上, 定标律过渡到 Y_K 正比于 I_0^2 . 对于喷 Ar 气负载^[5], 在 2.3 MA (PITHON 装置), A

MA (Double Eagle 和 Phoenix 装置), 6.5 MA (Saturn 装置), 15 MA (Z 装置) 电流下获得 Y_K 分别为 0.9, 5, 18 和 100 kJ/cm, 拟合出的临界电流 $I_{BP} \sim 4.5$ MA, 与简单定标模型的预测值相当. 在同等电流情况下, 负载材料电离到 K 壳层及碰撞激发所需能量随原子序数迅速增加, 因而随光子能量的增加, K 层辐射产额显著下降. 以 Z 装置为例^[6-9], 光子能量为 1.5, 8 keV 的 K 层辐射产额分别为 450、100 和 18 kJ.

“强光一号”加速器 (驱动电流 ~ 1.5 MA, 上升时间 ~ 80 ns) 是目前国内开展高功率 Z 箍缩实验研究的主要平台, 采用喷 Kr 气^[10] 和 W 丝阵^[11] 负载能获得几十个 kJ 的软 X 射线. 其驱动电流幅值介于二能级模型^[4] 给出的 Ne, Al 元素负载临界电流 I_{BP} 值 (分别为 0.7 MA 和 1.8 MA) 之间, 预计 Ne 等离子体的 K 层辐射产额将显著高于 Al.

近期在该加速器开展了 Al 丝阵 Z-pinch 内爆产生 K 层辐射的实验研究, 使用直径达 20 μm 的 Al 丝在低丝数、大丝间距情况下仍获得较佳的内爆效果, 产生 K 壳层 X 射线的高温高密度区域相对均匀, K 层产额超过 2 kJ, 最大功率超过 90 GW. 本文将介绍相关实验结果, 并作分析和讨论.

* 国家自然科学基金 (批准号: 10635050 和 10475065) 资助的课题.

2. 简单物理分析

要使 Al 等离子体通过碰撞电离到 K 壳层并激发跃迁,需要有足够高的电子温度.根据对类 H 离子电离平衡的估计, K 壳层辐射最大化时的电子温度与负载材料原子序数的定标关系为^[1]

$$T_e(\text{eV}) \approx 0.3Z^{2.9}. \quad (1)$$

对于 Al ($Z = 13$),即要求电子温度达到 ~ 510 eV 略高于 Al 的 L 层最后一个电子(即类 Li 的 Al^{10+} 离子外层电子)的电离能(442 eV),而远低于 K 壳层的第一个束缚电子电离能(2086 eV)^[12].考虑到外层电子电离及辐射发射的能量损失,在达到这个温度时,平均每个离子要消耗的最小能量为 $E_{\text{min}} = 13 \text{ keV/ion}^{[1,13]}$.

Z-pinch 等离子体在滞止阶段将内爆动能转化为热能,其中离子内爆动能(K_i)是主要能量来源,定义无量纲量 $\eta = K_i/E_{\text{min}}^{[1]}$,则获得 K 壳层辐射至少要求 $\eta > 1$,高产额情形应满足 $\eta > 2^{[1]}$,即离子内爆动能 $K_i > 26 \text{ keV/ion}$,内爆速度

$$v_i = \sqrt{2K_i/Am_p} > 30 \text{ cm}/\mu\text{s}, \quad (2)$$

其中 $A = 27$ 为 Al 元素原子量, m_p 为质子质量.

对于典型的负载线质量 $m = 50 \mu\text{g}/\text{cm}$,单位长度上的内爆动能 KE 应满足

$$KE = mv_i^2/2 > 4.6 \text{ kJ}/\text{cm}. \quad (3)$$

简单的零维薄壳模型给出,内爆动能 KE 主要由驱动电流决定:

$$KE(\text{kJ}/\text{cm}) = \gamma I_0^2(\text{MA}) \ln(R_0/R_f), \quad (4)$$

其中 γ 是与电流波形和内爆轨迹有关的定标因子,数值小于 1; I_0 为驱动电流幅值; R_0 和 R_f 分别为负载初始半径和最终箍缩半径.“强光一号”加速器的驱动电流 $\sim 1.5 \text{ MA}$,假定负载参数可优化到使定标因子 $\gamma = 0.9^{[14]}$,内爆压缩比 $R_0/R_f = 10$,则内爆动能 $KE = 4.7 \text{ kJ}/\text{cm}$,只不过是达到上述估计的下限值.因此,驱动电流过小决定了 Al 丝阵难以获得高的 K 层辐射产额.

此外,对于小装置还存在负载制作上的困难.Z-pinch 研究取得突破的一个根本性因素是采用大量细直径丝构成逼近于环形壳层的阵列负载,以改善内爆均匀性、获得高的辐射功率.Satum 的实验证实当 Al 丝阵的丝间距减小到 1.4 mm 以下时,总辐射功率显著增加^[15,16].若阵列直径 $\sim 10 \text{ mm}$,则丝数大

于 24 根才能满足丝间距小于 1.4 mm 的要求.而与小电流装置相匹配的负载质量一般很低,如(3)式中的 $m = 50 \mu\text{g}/\text{cm}$,丝数大于 24 即要求 Al 丝线径不超过 $10 \mu\text{m}$,在金属丝加工工艺和丝阵组装上目前国内尚有相当难度.

当前“强光一号”上用的丝阵负载采用直径为 $20 \mu\text{m}$ 的商品级细 Al 丝,单根丝线质量 $8.5 \mu\text{g}/\text{cm}$,由 8 根和 12 根 Al 丝构成直径 $D = 12 \text{ mm}$ 的环形阵列,负载线质量就达到 $m = 68 \mu\text{g}/\text{cm}, 102 \mu\text{g}/\text{cm}$,而丝间距分别为 3.1 和 4.7 mm,构形严重偏离薄壳结构,原则上应表现为多根单丝内爆的简单叠加,箍缩品质较差^[15,16].增加到 16 和 24 根丝,负载线质量过大, $\eta > 1$ 的条件就很难满足.

从这些分析来看,因负载质量偏重、丝间距过大,Al 丝阵负载的 K 层产额很可能难以获得基于二级模型^[4]预计的 1—2 kJ 优化产额^[17].当然,以上分析隐含的一个前提是所有负载质量都按薄壳模型内爆,并同时热化、辐射.如果实际情形与此不符,比如说负载质量按少量多次内爆,那么结果自然有所不同.下文所给实验结果将证实这一点.

3. 实验描述

“强光一号”加速器驱动 Z-pinch 负载时,初级储能 $\sim 230 \text{ kJ}$,经脉冲压缩、成形后输送到真空二极管区域的电脉冲能量为 80—110 kJ,负载上获得驱动电流幅值 1.3—1.8 MA,10%—90% 上升时间 $\sim 80 \text{ ns}$.

丝阵负载初始构形如图 1 所示.8—24 根直径 $20 \mu\text{m}$ 的 Al 丝对称地排列在直径 $D = 12 \text{ mm}$ 的圆周上,负载轴向长度为 $L = 20 \text{ mm}$.当电流脉冲通过时,单根金属丝气化并电离形成等离子体,在早期全局磁场较弱,这部分单丝等离子体再急剧膨胀,直径可以达到 1—2 mm.

丝阵在磁压驱动下的内爆产生高温高密度的等离子体,发出强烈的软 X 辐射,实验中以 Al 阴极 XRD 探测器和软 X 射线 8 分幅相机^[18]诊断等离子体的内爆和辐射特性,并通过加不同厚度的滤片分别对光子能量 $\sim 100 \text{ eV}$ 的 XUV 发射($2.5 \mu\text{m}$ Mylar 膜滤片)和光子能量 $\sim 1.7 \text{ keV}$ 的 K 壳层发射($15 \mu\text{m}$ 聚乙烯 + $2.5 \mu\text{m}$ Mylar + $0.4 \mu\text{m}$ Al 膜复合滤片)进行分能区的诊断.根据 Al 阴极对 X 射线光电子量子效率^[19]和滤片材料的透过率^[20]计算的 XRD 探

测器谱响应如图 2 所示。Al 等离子体的 K 层辐射处于 1.6—2.3 keV 范围，K 层辐射探测器在该能区响应相对平坦，灵敏度约 3 A/MW。XUV 辐射探测器响应非平坦，考虑到等离子体的低能辐射以 100—300 eV 能段的韧致辐射为主，以该能段的平均值 8 A/MW 作为参考灵敏度，便于不同发次辐射功率波形的比较。分幅相机针孔尺寸 $\sim 100 \mu\text{m}$ ，成像放大率 $M = 0.31$ ，曝光时间 $\sim 2 \text{ ns}$ ，幅间隔 5—10 ns，对 XUV 和 K 壳层能区的空间分辨率分别为 0.7 mm 和 0.4 mm。此外，基于 TAP 晶体和软 X 射线像增强器发展了 1 维空间分辨的弯晶摄谱仪^[21]记录 Al 等离子体的 K 壳层线辐射谱。

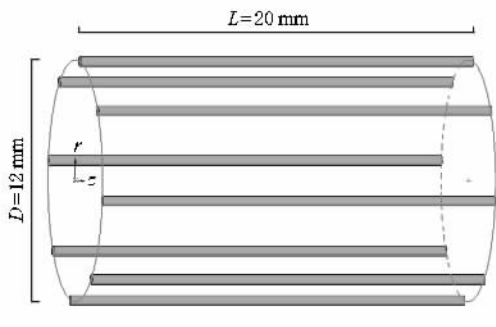


图 1 Al 丝阵负载初始构型示意图

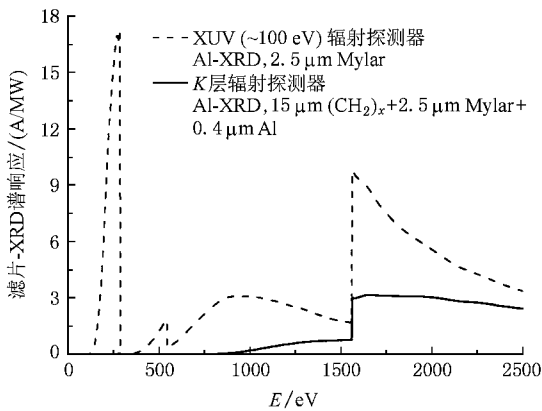


图 2 XUV 和 K 层辐射探测器的灵敏度谱响应

4. 主要结果及分析

图 3 给出了 Al 丝阵负载的驱动电流和 X 射线功率的典型关联波形 (Shot 08087)，可见：1) 在电流主脉冲到来之前存在幅度 $\sim 150 \text{ kA}$ 、持续时间 $\sim 200 \text{ ns}$ 的预脉冲，其强度足以使金属丝发生电爆炸、形成等离子体；2) XUV 能区的软 X 射线发射起始时刻比 K 层辐射功率波形早 20—30 ns，前者对应较低的

等离子体温度，与丝阵内爆的启动相关，而 K 层辐射只能由高温等离子体产生，对应丝阵内爆的轴线滞止与热化；3) K 层辐射功率 10%—90% 上升时间 $< 5 \text{ ns}$ ，意味着等离子体的最终内爆速度达到几十 $\text{cm}/\mu\text{s}$ 。

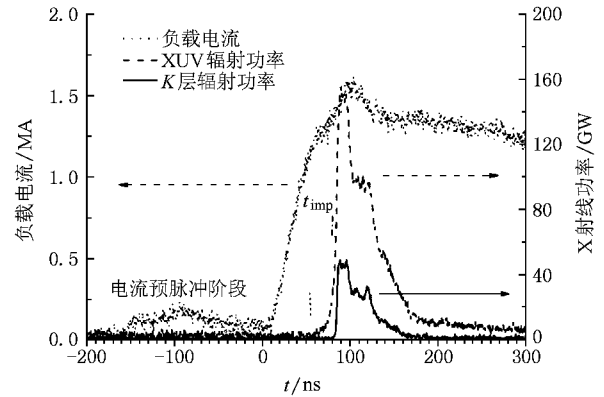


图 3 驱动电流和 X 射线功率的典型关联波形 (Shot 08087)

图 4 所示为该发次 K 层发射区域时间积分图像，由灰度值大于峰值灰度 50% 的像素点面积除以区域长度给出发射区“平均”直径 (D_k) 为 1.8 mm，说明内爆压缩比不到 7。K 层发射区域分布于几乎全部轴向长度上，表明相当部分箍缩等离子体都达到了高温状态，对 K 层辐射都有贡献，图上几个“热斑”的存在反映了箍缩过程中的轴向不均匀性。

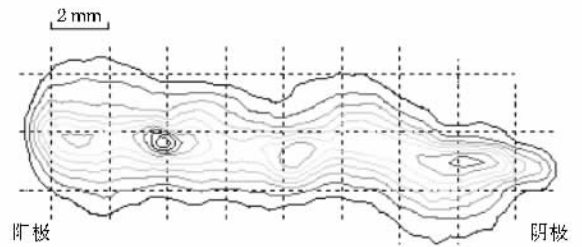


图 4 典型的 K 层发射区域时间积分图像 (Shot 08087)

图 5 所示为轴向分辨的弯晶谱仪记录的 Shot 08087 时间积分的 K 层辐射谱部分结果，确认了探测器和图像信号是 Al 等离子体的 K 层谱线，并在轴向尺度上与图 4 的时间积分 K 层辐射图像相符。

表 1 列出了本轮共 18 发次实验的关键参数。其中内爆时间 t_{imp} 定义为电流主脉冲和 X 射线功率波形上升沿线性外推到时间坐标轴的间隔 (见图 3)，表征从电流起始至等离子体内爆到轴心所需时间。从表中数据的对比可知，丝根数和负载线质量的变化对负载的内爆和 K 层辐射有显著影响。

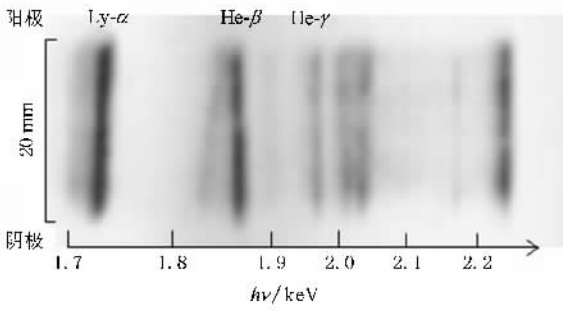


图 5 Shot 08087 时间积分 K 层辐射谱(部分)

$N = 24, m = 204 \mu\text{g}/\text{cm}$ 的负载丝间距最小但也最重, $t_{\text{imp}} \sim 140 \text{ ns}$, $P_K < 10 \text{ GW}$, $Y_K \sim 180\text{--}200 \text{ J}$, 远小于其他负载的结果. 功率波形和 K 层发射区域图像表明, 这部分高能辐射主要来源于先后出现的、由不稳定性引起的等离子体局部热斑. 其余绝大多数质量温度都较低, 不仅不参与发射反而有吸收作用.

$N = 16, m = 136 \mu\text{g}/\text{cm}$ 的负载 $t_{\text{imp}} \sim 110\text{--}120 \text{ ns}$, $P_K \sim 20\text{--}50 \text{ GW}$, $Y_K \sim 500 \text{ J}$. 大部分发次的 K 层辐射功率波形存在一个很窄($\tau_{\text{FWHM}} \sim 3\text{--}8 \text{ ns}$)的主峰, 如图 6 所示, 但后沿很长, 可能出现对应热

表 1 “强光一号”Al 丝阵 Z 箍缩 18 发次实验的关键参数, 其中部分缺失或不确切数据以“—”标示

丝根数 N	丝间距 /mm	线质量 m ($\mu\text{g}/\text{cm}$)	发次 (Shot No.)	电流幅值 I_0/MA	内爆时间 t_{imp}/ns	XUV 脉宽 $\tau_{\text{FWHM}}/\text{ns}$	K 层辐射			
							功率 P_K/GW	脉宽 $\tau_{\text{FWHM}}/\text{ns}$	产额 Y_K/J	发射区直径 D_K/mm
8	4.7	68	08081	1.32	75	47	63	12	1647	1.9
8	4.7	68	08082	1.45	80	49	65	20	1809	2.6
8	4.7	68	08085	1.7	110	50	23	45	944	1.5
8	4.7	68	08086	—	—	—	66	12	1387	1.5
8	4.7	68	08087	1.48	80	42	49	38	1797	1.8
12	3.1	102	08063	1.71	110	28	33	10	713	1.3
12	3.1	102	08064	1.58	95	51	49	48	2218	2.1
12	3.1	102	08083	1.47	90	58	93	15	2319	2.2
12	3.1	102	08084	1.44	95	38	34	28	1084	1
16	2.3	136	07160	1.4	114	—	33	8	499	1.5
16	2.3	136	07161	1.54	122	—	51	6	557	1.6
16	2.3	136	07162	1.55	117	—	54	3	540	1.2
16	2.3	136	07172	1.48	110	—	41	6	486	1.5
16	2.3	136	07174	1.49	113	—	21	13	453	1.7
16	2.3	136	08066	1.78	125	23	28	11	549	1.5
24	1.6	204	07163	1.48	144	—	9	—	208	—
24	1.6	204	07164	1.53	136	—	8	—	184	1.5
24	1.6	204	07165	1.56	136	—	8	—	178	—

斑辐射的小峰, 脉冲底宽达 40—80 ns. 典型的分能区 X 射线图像如图 7 所示, 其中每幅的曝光时刻都有两个数值, 分别为关联到电流主脉冲外推零点和 X 射线功率上升沿 50% 处的相对值. 可见在电流起始 80—90 ns 后丝阵才明显偏离初始位置(图 7(a)), 内爆过程中等离子体发展极不均衡, 一部分快速向轴心聚爆, 另一部分则留在初始半径处(图 7(c))形成质量拖尾, 待前者基本内爆到轴心、形成高温的 K 层发射体后(图 7(e)), 外围的拖尾质量发光变得异常强烈(图 7(d)), 反映电流已迁移到大半径

处. 线状的 K 层发射体明显扭曲(图 7(e)), 与内爆早期的初始扰动(图 7(b))及其迅猛发展(图 7(c))有关, 而且很快飞散, 意味着其质量份额很少、约束时间短. 由时间关联可知功率波形上的主峰与此次内爆对应, 因辐射强度大, 时间积分的 K 层图像主要由它决定, 表现为图 7(h)与(e)较相似.

丝根数进一步降低后, $t_{\text{imp}} \sim 80\text{--}90 \text{ ns}$, K 层辐射产额有明显提高. $N = 8, m = 68 \mu\text{g}/\text{cm}$ 丝阵有 4 发次 K 层产额为 1.4—1.8 kJ, $N = 12, m = 102 \mu\text{g}/\text{cm}$ 丝阵有两发产额达到 2.2 kJ 以上. 这两种负载中有

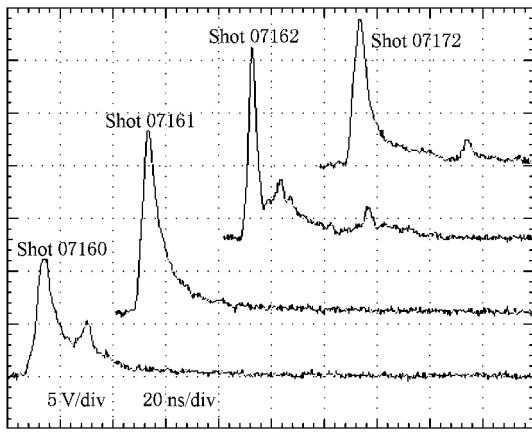


图 6 N = 16 丝阵 K 层辐射功率波形

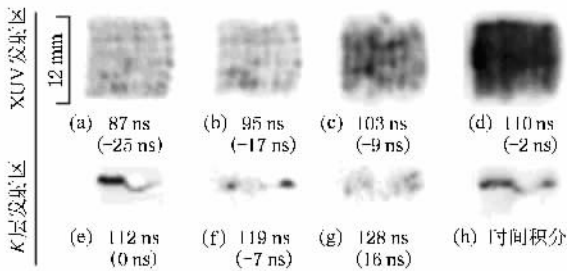


图 7 Shot 0717X ($N = 16$) XUV (a—d) 和 K 层发射 (e—g) 图像 (图中标示的曝光时刻分别为关联到电流波形 (上) 和 X 射线波形的相对值 (下))

两发产额相对较低 (Shot 08084 和 Shot 08085), X 射线图像表明它们存在丝阵初始弯曲、错位以致对称性下降、内爆品质变差, 但产额仍高于 $N = 16$ 丝阵.

实验获得的辐射产额可与环形壳层分布等离子体的 1 维 MHD 模拟结果^[3]相比拟, 而高于利用二能级模型做出的预测^[17]. 不过模拟和定标分析中都假设全部质量一次性内爆, 而实验中大部分发次的辐射功率波形上出现了明显的双峰脉冲, 表明出现了不止一次内爆. 如图 8 所示的功率波形中, 在主内爆峰后 ~ 30 ns 都出现了二次内爆峰, XUV 辐射的二次峰可接近主峰, 而 K 层辐射功率则一般不超过主峰的一半, 但对总的 K 层产额仍有 $\sim 20\% - 30\%$ 的贡献. 先后两次内爆使 X 射线辐射脉宽大大增加, 如表 1 所示, XUV 脉冲半宽度 (FWHM) 在 50 ns 上下, 而 K 层辐射脉宽则因二次峰贡献的变化介于 10 ns 与 50 ns 之间. 实验发现, $N = 12, m = 102 \mu\text{g}/\text{cm}$ 的 4 发次在 XUV 辐射功率上明显高于 $N = 8, m = 68 \mu\text{g}/\text{cm}$ 负载, 获得的最大 K 层辐射功率和产额也是前者高于后者.

X 射线分幅图像显示, 二次内爆由质量拖尾引起. 如图 9 (a) (b) 所示, 在 ~ 9 ns 的时间内, 丝阵主体直径从 ~ 10 mm 压缩到 ~ 6.5 mm, 但部分等离子体留在了原来位置构成拖尾质量, 并存在轴向不均

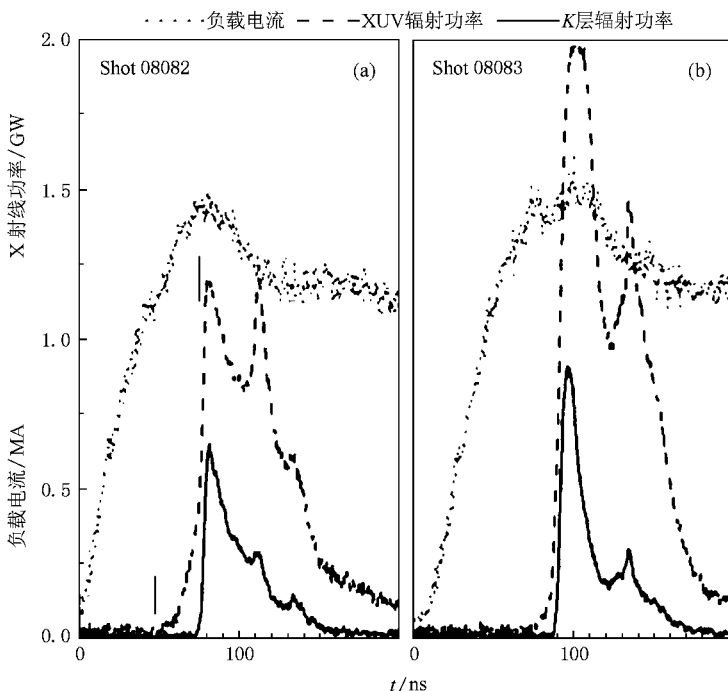


图 8 $N = 8$ 和 $N = 12$ 丝阵辐射功率波形中出现明显双峰

匀性.主内爆最终形成直径 ~ 2 mm的 K 层发射体(图9(c)),几乎同时,等离子体发光区又扩展到直径 ~ 11 mm(图9(e)),说明电流在主内爆后期完成了向停留在外围的拖尾质量的迁移,并引发二次内爆.在 ~ 11 ns内从直径 ~ 11 mm压缩到 ~ 5.2 mm(图9(f)强发光边界),而且仍然存在质量拖尾(弱发光边界几乎未缩小),但从发光强度看,拖尾质量份额可能小于主内爆(图9(b)),不过这部分质量有可能继续引起三次内爆.在图8(a)中二次峰后面即出现了幅度不小的三次峰.对比可知,主内爆在角向对称性和轴向均匀性上表现出优势,最终形成的 K 层发射体较细和均匀;而二次内爆则因拖尾质量本来就轴向不均匀,丝阵内部分布有辐射坍塌后飞散的(主内爆)等离子体等因素作用,品质大大下降(图9(e)(f)),产生的 K 层发射体径向尺度大大扩展、轴向扭曲(图9(g)–(h)).

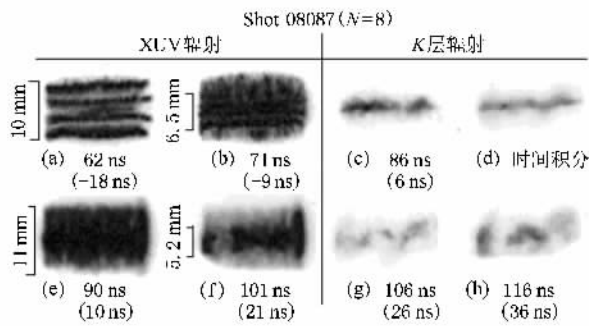


图9 丝阵主内爆和二次内爆品质比较,曝光时刻定义同图7

拖尾质量的出现与丝阵等离子体形成和发展的不均匀性有关.在内爆启动阶段,各单丝等离子体在轴向演化为“热斑”和“间隙”组成的周期性调制结构,这在图9(a)中已有所表现,分辨更清晰的结果如图10所示,调制波长 ~ 1 mm.不同丝上热斑和间隙出现的位置存在某种相关性,即具有等离子体不稳定性全局 $m=0$ 模式特征的角向关联性.轴向调制结构意味着等离子体的状态参数、质量和电流分布本身有大的差别,在内爆启动阶段部分冷而重的

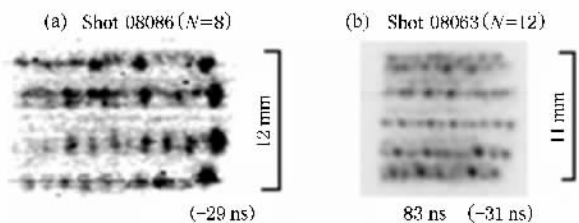


图10 XUV图像中的轴向调制结构,曝光时刻定义同图7

质量就有可能被留在初始位置,而丝间距过大也使得在内爆过程中还可能有等离子体被甩下.

如前所述,在主内爆后期电流向处在外围的拖尾质量迁移,因而使磁压驱动力减小、能量耦合下降,故拖尾质量的分流起了负面作用.但也应注意到,驱动电流偏小时本身就难以驱动全部质量,实验结果显示负载质量的这种分批内爆和热化至少能让相当部分等离子体达到高温并产生 K 壳层发射.简单的动力学计算表明,对于20—30 ns内完成的主内爆,1—1.5 MA的电流有效驱动负载质量份额不到50%.小质量快速内爆可以获得高的内爆速度,取 $R_0=6$ mm, $R_f\sim 1$ mm, $\Delta t\sim 20$ —30 ns,按匀加速运动估计 $v_f\sim 40$ —50 cm/ μ s,实际上磁压内爆的加速度是递增的,因而 v_f 很可能更高.仅考虑动能的热化,这样的内爆速度已经远远超过了(2)式的要求,足以让相当部分内爆等离子体参与 K 层发射.

5. 结 论

简单的物理分析表明,要使Al丝阵Z-pinch负载内爆产生大量 K 壳层发射,对于电流较小的驱动源和低丝数阵列负载似乎是一个很苛刻的要求.但实验证明并非如此.用8根和12根、直径20 μ m的Al丝构成环形阵列,在“强光一号”驱动下发生Z-pinch内爆,获得 K 层产额分别为0.9 kJ/cm和1.1 kJ/cm,超出基于二能级模型^[4]的简单估计^[17].

辐射功率波形和时间分辨的X射线图像显示,低丝数负载存在质量拖尾引起的多次内爆现象.在60%—80%的内爆时间内,丝阵几乎停留在初始位置,主体内爆在随后的25—30 ns内完成,将部分等离子体留在初始位置,形成质量的拖尾分布;内爆后期因阻抗增大、不稳定性发展,驱动电流向外围拖尾质量迁移,引发二次乃至三次内爆,后续内爆对 K 层辐射也有相当贡献.拖尾质量的出现与单丝等离子体上形成的轴向调制结构及不均匀性的发展有关.

质量拖尾、多次内爆及电流的再分布使内爆过程大大复杂化,这样基于简单零维薄壳模型和1维MHD模拟对驱动电流和丝阵的初始宏观参数(初始半径、线质量)的定标因过于理想而偏离了实际.从表1数据即可见,有3发次电流达到1.7 MA以上,但内爆时间都在110 ns以上, K 层产额也相对较低,而电流较小的发次反而内爆早、 K 层产额高.因此应具体研究丝阵的动力学演化过程.不同丝数的结

果对比表明,对给定的驱动电流水平、丝阵直径和 Al 丝线径, $N = 12$ 的丝阵在质量分布和电流分配上更有利于将电磁能量耦合至形成 K 层发射体。

除开外在因素引起的初始形变,作为一种脉冲放电等离子体,即使初始的宏观参数相同,不同发次

中的丝阵仍可能在内爆启动、等离子体时空分布、电流分配等方面表现出自组织性和复杂性,因而部分消解了对宏观量作定标研究的意义。有必要以高精度实验诊断或数值模拟专门研究等离子体质量和电流的时空分布及动力学演化对辐射参数的影响。

- [1] Whitney K G , Thomhill J W , Apruyese J P *et al* 1990 *J. App. Phys.* **67** 1725
- [2] Whitney K G , Thomhill j W , Giuliani J L *et al* 1994 *Physical Review E* **50** 2166
- [3] Thomhill J W , Whitney K G , Daus J *et al* 1996 *Journal of Applied Physics* **80** 710
- [4] Mosher D , Qi N S , Krishnan M *et al* 1998 *IEEE Transactions on Plasma Science* **26** 1052
- [5] Sze H , Banister J , Failor B H *et al* 2002 *AIP Conference Proceedings* (651) 101
- [6] Struve K W , Corley J P , Johnson D L *et al* 2001 28th *IEEE International Conference on Plasma Science and 13th IEEE International Pulsed Power Conference* (vol. 1) 569
- [7] Deeney C , Coverdale C A , Douglas M R *et al* 1999 *Physics of Plasmas* **6** 2081
- [8] Sze H M , Levine J S , Banister J W *et al* 2002 *IEEE Transactions on Plasma Science* **30** 532
- [9] Jones B , Deeney C , Coverdale C A *et al* 2006 *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **99** 341
- [10] Kuai B , Cong P T , Zeng Z Z *et al* 2002 *Plasma Science & Technology* **4** 1329
- [11] Qiu A C , Kuai B , Zeng Z Z *et al* 2006 *Acta Physica Sinica* **55** 5917 (in Chinese)[邱爱慈、蒯 斌、曾正中等 2006 物理学报 **55** 5917]
- [12] Ralchenko Y , Jou F C , Kelleher D E *et al* *NIST Atomic Spectra Database* (version 3. 1. 1) , [Online]. Available : <http://physics.nist.gov/asd3> [2007 , March 23]. National Institute of Standards and Technology , Gaithersburg , MD
- [13] LePell P D , Coverdale C A , Deaney C *et al* 2003 *IEEE Pulsed Power Conference* , Dallas , Texas
- [14] Zeng Z Z , Qiu A C 2004 *Chin. Phys.* **13** 0201
- [15] Sanford T W L , Mock R C , Spielman R B *et al* 1998 *Physics of Plasmas* **5** 3737
- [16] Sanford T W L , Mock R C , Spielman R B *et al* 1998 *Physics of Plasmas* **5** 3755
- [17] Kuai B , Failor B H , Qiu A C , Zeng Z Z *et al* 2007 *High Power and Laser and Particle Beams* **19** 981 (in Chinese)[蒯 斌、邱爱慈、曾正中等 2007 强激光与粒子束 **19** 981]
- [18] Qiu M T , Lü M , Wang K L *et al* . 2003 *High Power and Laser and Particle Beams* **15** 101 (in Chinese)[邱孟通、吕 敏、王奎禄等 2003 强激光与粒子束 **15** 101]
- [19] Bentley C D , Slark G , Gales S G 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 2220
- [20] Henke B L , Gullikson E M , Davis J C 1993 *Atomic Data and Nuclear Data Tables* **54**(2) 181
- [21] Wu G , Qiu A C , Lü M *et al* 2007 *Proceedings of the 13th national symposium on plasma science and technology* , Chengdu , Sichuan , China

Experimental study on K -shell radiation production of aluminum wire array Z-pinch at Qiangguang-I facility^{*}

Wu Gang^{1,2)} Qiu Ai-Ci²⁾ Li Min¹⁾ Kuai Bin²⁾ Wang Liang-Ping²⁾ Cong Pei-Tian²⁾ Qiu Meng-Tong²⁾
Lei Tian-Shi²⁾ Sun Tie-Ping²⁾ Guo Ning²⁾ Han Juan-Juan²⁾ Zhang Xin-Jun²⁾ Huang Tao²⁾
Zhang Guo-Wei²⁾ Qiao Kai-Lai²⁾

¹ *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

² *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*

(Received 25 August 2008; revised manuscript received 17 October 2008)

Abstract

Experimental study of aluminum wire array Z-pinch was conducted on Qiangguang-I facility (1.5 MA, 80 ns) to produce 1.7 keV characteristic X-ray radiation. With fixed wire diameter of 20 μm and annular diameter of 12 mm, K -shell yield up to 0.9 kJ/cm and 1.1 kJ/cm was obtained for wire number $N = 8$ and $N = 12$ arrays, respectively, which are much higher than that for $N = 16$ and $N = 24$ loads. X-ray power waveforms and time-resolved images showed that several implosions occurred due to the existence of trailing mass. During 60%—80% of the whole implosion time the wire array almost stayed at its initial position rather than running inwards. Main implosion was completed in the next 25—30 ns, with parts of load mass left behind and forming so-called trailing mass. At later time of main implosion, load current was transferred to trailing mass left in outer radii, and caused secondary even tertiary implosion, which also contributed to total K -shell yield. Appearance of trailing mass might be caused by azimuthally correlated axial modulation, consisting of hot spots and gaps on wire plasma column, as well as the development of other inhomogeneities.

Keywords : aluminum wire array, Z-pinch, K -shell radiation, trailing mass

PACC : 5225P, 5230