

1—4 MA 电流驱动的丝阵 X 光辐射优化的实验研究*

王真^{1)†} 李正宏¹⁾ 徐荣昆¹⁾ 杨建伦¹⁾ 丁宁²⁾ 许泽平¹⁾ 郭存¹⁾ 宁成²⁾ 宁家敏¹⁾
蒋世伦¹⁾ 章法强¹⁾ 夏广新¹⁾ 李林波¹⁾ 叶凡¹⁾ 秦义¹⁾ 薛飞彪¹⁾ 陈进川¹⁾

1) (中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

2) (北京计算数学与应用物理研究所, 北京 100088)

(2009年11月20日收到; 2010年4月23日收到修改稿)

进行了1—4 MA 电流驱动的钨丝阵列负载的 Z 箍缩实验研究, 通过丝阵参数、负载电极结构的优化设计及负载初始装配状态的控制优化 X 光辐射功率, 在单、双层丝阵的内爆实验中分别获得 5.3 ± 1.0 TW 和 5.6 ± 1.1 TW 的峰值辐射功率, 创同类装置上 X 光辐射功率的最高纪录.

关键词: Z 箍缩, 丝阵 X 光辐射, 优化

PACS: 52.59.Qy, 52.70.La

1. 引言

近年来, 丝阵 Z 箍缩的研究取得了突破性的进展, Sandia 实验室在 Z 装置上用 20 MA 电流驱动单层钨丝阵列负载内爆产生了峰值功率为 200 TW 和总能量为 2 MJ 的软 X 光辐射场^[1], 驱动双层钨丝阵内爆产生的峰值辐射功率达到 290 TW^[2], 是迄今为止实验室产生的最强 X 射线源. 实验结果外推及理论模拟验证均表明, 利用丝阵 Z 箍缩的强 X 光辐射场构建黑腔驱动小丸内爆, 在 50—60 MA 电流的驱动下可以吸收 1 MJ 能量并产生 380 MJ 的聚变增益^[3,4], 是具有很高效费比的 ICF (inertial confinement fusion) 研究途径.

作为真空黑腔初始输入能量的加载源, 丝阵 X 射线辐射的强度是影响黑腔辐射场强度的关键因素之一, 优化提高丝阵 X 光辐射场的强度, 可以减小 ICF 研究对脉冲功率源驱动能力的要求. 低电流 (1—4 MA) 驱动装置适于进行大驱动电流条件下的 ICF 物理分解实验研究, 研究丝阵负载与驱动电流的参数匹配及 X 射线辐射场的优化实验技术, 探索抑制瑞利-泰勒不稳定性, 提高 X 射线辐射功率的有

效途径, 为 10 MA 级电流驱动的黑腔和 ICF 研究提供技术支撑.

2. 实验设置

研究主要利用强光一号和 Angara-5 装置进行, 其中位于西北核技术研究所的强光一号是目前国内最大的快脉冲功率驱动装置, 电磁储能为 260 kJ, 能够将 80 kJ 的能量注入到金属丝阵负载, 提供峰值为 1.5 MA, 上升前沿为 80 ns 的负载电流, 产生超过 30 kJ 的软 X 射线辐射^[5]; 位于俄罗斯创新与热核聚变研究所 (TRINITI) 的 Angara-5 装置能够提供 600 kJ 的电磁储能, 可以在 70 ns 的时间内将峰值 3—4 MA 的电流加载到金属丝阵负载上, 驱动负载内爆产生超过 100 kJ 的软 X 射线辐射.

实验使用单层和双层钨丝阵两类负载, 进行丝阵内爆基础物理问题的研究, 探索磁瑞利-泰勒 (MRT) 不稳定性的有效抑制措施, 以实现丝阵等离子体内爆聚心物理过程的同时, 均匀、快速和整体性, 提高 X 射线辐射功率, 获取优化的丝阵 X 射线辐射, 应用于下一阶段黑腔物理问题的研究及黑腔的优化设计. 使用的钨丝包括三种直径, 4.2, 5 和 6

* 国家自然科学基金重点项目 (批准号: 10035030, 10635050) 资助的课题.

† E-mail: wangzhen@tsinghua.org.cn

μm ,每一发负载所含钨丝数量从 32 到 128 根不等,详细的负载参数如表 1 所示.

丝阵 X 射线辐射参数的测量使用的是自行研制的 X 射线功率谱仪,对 50 eV—1.4 keV 的软 X 射线辐射具有平坦的能谱响应,可覆盖丝阵 X 射线辐射的主要能段,对辐射功率和辐射总能量的测量不确定度为 20%^[6];另外还使用了十分幅纳秒 X 射线相机和

一维时空分辨 X 射线辐射功率成像系统对 X 射线辐射场的分布进行诊断^[7],前者可获取十幅时间间隔为 10 ns,曝光时间为 1.5 ns 的瞬态 X 射线辐射强度的二维(r - z)空间分布图像,图像的空间分辨为 150 μm ,后者借助于平坦的能谱响应特性可以测量丝阵径向或轴向不同位置的 X 射线辐射功率随时间的连续变化过程(r - t 或 z - t),空间分辨为 200 μm ,时间分辨为 2 ns.

表 1 实验负载参数表

负载类型	负载代号 [†]	钨丝直径/ μm	丝根数 (外层/内层)	丝间距/mm	丝阵长度/mm	丝阵直径/mm
单层丝阵	QS1	4.2	48	0.52	20	8
	QS2	5	32	0.79	15	8
	QS3	5	32	0.79	20	8
	QS4	5	32	0.79	25	8
	AS1	4.2	128	0.44	15	18
	AS2	5	48	0.79	15	12
	AS3	5	60	0.63	15	12
	AS4	5	90	0.42	15	12
	AS5	6	60	0.63	15	12
	双层丝阵	AD1	4.2	86/43	0.66/0.66	15
AD2		4.2	86/43	0.73/0.73	15	20/12
AD3		5	60/30	0.63/0.63	15	12/6
AD4		6	40/20	0.94/0.94	15	12/6
AD5		6	60/30	0.63/0.63	15	12/6
AD6		6	30/60	1.26/0.31	15	12/6

注:负载代号中的字母含义为:A 代表 Angara-5 实验使用的负载,Q 代表强光实验中使用的负载,S 和 D 则分别代表单层和双层丝阵负载.

3. 强光一号实验结果及分析

Lebedev 等^[8]的研究结果指出,丝阵负载的箍缩品质与丝间距的大小密切相关,较小的丝间距有利于相邻丝等离子体的有效融合,形成均匀的等离子体内爆壳层,提高箍缩品质;另一方面,加速器的驱动电流水平对负载质量有一个限制范围,过重的负载会使内爆时间增加,内爆坍塌发生之前电流脉冲即已结束,过轻的负载则会导致内爆坍塌发生时电流峰值尚未到达的情况,电磁能均不能得到充分有效的利用.因此,缩小丝间距以提高内爆品质必须建立在适当的丝阵负载质量前提下.

3.1. 改变丝阵长度

之前的实验^[5]和理论分析^[9]均已表明,在当前

的丝阵制备水平条件下,8 mm 直径的丝阵负载较适用于强光一号的驱动电流条件;文献[10]对强光一号上 5 和 6 μm 两种丝直径负载(除了钨丝直径,其他参数均相同)进行了比较,分析结果显示 5 μm 丝直径的负载具有更好的内爆品质,辐射功率更高;文献[11]观察到了两极等离子体喷射,破坏了等离子体内爆的同步性和整体性,这是由于负载电压高(700 kV)以及电极结构的不合理导致两极表面的畸变电场强度过高,从而引起的电极等离子体喷射.

为了抑制两极等离子体的不利影响,我们对负载电极结构进行了针对性优化设计,以降低电极表面的局部不均匀导致的电场畸变,同时改变丝阵负载长度, $E = U/d$,在负载电压 U 不变的条件下,通过增加负载长度 d 降低整体电场强度,即表 1 中列出的 QS2—QS4 三种负载,每种负载各三发有效实验,等离子体辐射参数的数据对比见表 2.

表2 只改变丝阵负载长度的辐射参数对比

负载	平均电流/MA	平均功率/TW	平均能量/kJ
QS2 (15 mm)	1.42	0.47	14.6
QS3 (20 mm)	1.32	0.47	17.5
QS4 (25 mm)	1.38	0.48	16.7

图1给出了三种负载的X光辐射图像的变化过程,其中两侧电极附近出现的与电极平行的亮线即是两极等离子体的辐射发光图像,从图中可以看出,随着负载长度的增加,电极喷射出的等离子体辐射强度明显减弱,对25 mm长度的丝阵负载,图像中几乎已观测不到两极等离子体,相应地,在同等驱动电流条件下,15 mm短丝阵负载的X光辐射功率和辐射能量均较低(见表2).另一方面,随着负载长度的增加,丝阵的装配难度加大,在强光一号装置上圆柱型丝阵的轴向与水平方向平行,金属丝在重力的作用下很难保持平直的初始状态,从而影响内爆品质.等离子体在内爆滞止阶段表现出显著的扭曲和腊肠不稳定性(如-0.6 ns时刻的图像所示),因此25 mm长度的负载虽然在两极等离子体抑制这一点上比20 mm长度的负载好,但等离子体的内爆品质较差,不同发次之间的涨落较大,在最终的辐射参数上没有表现出优势.

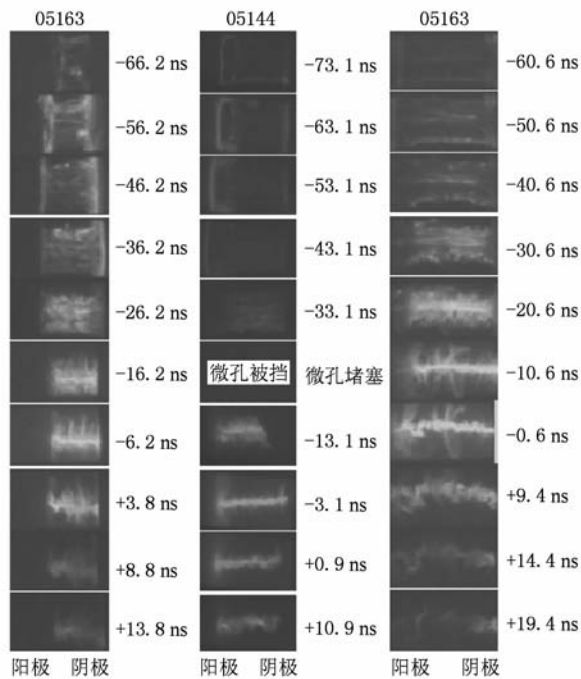


图1 三种长度丝阵负载的内爆X光辐射图像 从左至右依次为15,20和25 mm,图像从上至下依内爆时间早晚的顺序排列

从表2中还可以看出,两极等离子体影响较弱

的后两种丝阵负载,等离子体的辐射功率和辐射能量基本相当,但20 mm负载在等离子体滞止阶段的体积比25 mm负载小.相应地,其辐射功率密度和辐射能量密度更高,借助于丝阵内爆辐射的这一特性,在进行黑腔物理问题的研究时使用较短的丝阵负载可以缩小黑腔体积,提高黑腔辐射温度.

3.2. 改变单丝直径

在同等的负载线质量条件下,单丝直径越小,丝阵中金属丝的数量越多,丝间距越小,相邻丝等离子体的融合也更充分,实现单丝内爆模式向壳层内爆模式的转换,从而改善等离子体内爆品质.实验中固定丝阵负载质量,对4.2 μm(48根)和5 μm(32根)两种金属丝组成的负载进行了内爆辐射参数的比较分析,丝间距分别为0.52和0.79 mm,其中前者已接近文献[8]给出的内爆模式转换的临界丝间距,实验结果见表3.

表3 丝阵长度、直径和线质量不变,不同单丝直径负载的辐射参数对比(5 μm@4.2 μm)

负载	炮号	电流/MA	功率/TW	能量/kJ
QS3	7306	1.40	0.51	23.1
QS3	7307	1.39	0.50	21.3
QS3	7308	1.32	0.53	22.5
QS3	7309	1.31	0.52	23.7
QS3	7314	1.31	0.48	18.9
QS3	7315	1.24	0.42	20.8
QS1	7311	1.37	0.58	20.8
QS1	7313	1.39	0.49	19.7
QS1	7316	1.34	0.50	20.8
QS1	7317	1.30	0.45	18.7
QS1	8322	1.25	0.45	17.2
QS1	8323	1.33	0.43	15.2

在每种负载的各6发有效实验数据中,4.2 μm负载在1.33 MA的平均电流驱动下的平均辐射参数为0.48 TW/18.7 kJ,与预计结果不同的是,5 μm负载在1.33 MA的平均电流驱动下产生的X射线辐射为0.49 TW/21.7 kJ,比4.2 μm负载略高.经分析,主要原因是强光一号上负载为水平安装,4.2 μm钨丝较细,丝质量初始分布的相对不均匀性较5 μm丝显著,在同样的20 mm长度条件下,较细的金属丝在重力的作用下很难保持平直的初始状态,导致在内爆过程中瑞利-泰勒(RT)不稳定性增长显

著,抵消了丝间距减小带来的优势.

4. Angara-5 实验结果及分析

与强光一号装置不同,Angara-5 装置上的负载电压低得多(300 kV),因此能够采用较短的丝阵(15 mm)而不会出现不利的两极等离子体喷射现象,以提高等离子体的辐射功率密度和辐射能量密度,利于黑腔物理问题的研究;同时,Angara-5 装置上丝阵负载的轴向方向处于竖直平面内,金属丝可以保持较好的平直状态,有利于负载内爆品质的改善.

4.1. 丝阵初始状态对内爆品质的影响

前面的分析中提到,负载电流流过金属丝之前,丝初始状态的平直性对内爆辐射过程有影响.在 Angara-5 的实验中,对实验负载装配完成后的初始状态进行了监测,并与最终的内爆辐射参数进行了对比分析.图 2 给出了其中三发实验的情况,其中 4405 和 4408 两发为 AS4 类型的负载,4418 为 AS5 类型的负载.

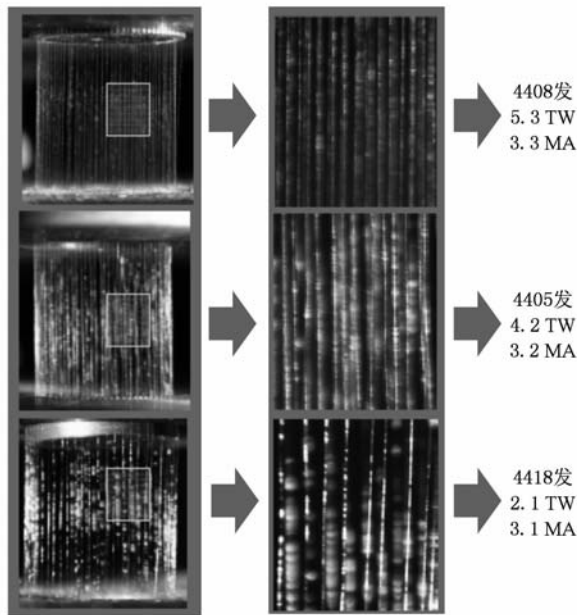


图2 金属丝阵列负载装配后的初始状态与内爆辐射参数的关联性

4408 发次实验中,丝阵初始状态较佳,金属丝无弯曲,相互之间间距均匀,最终在 3.3 MA 峰值电流的驱动下内爆获得了 5.3 的 X 光辐射功率;而同类型负载的 4405 发次实验中,部分相邻的金属丝出

现扭曲,4418 发次实验中该现象更为严重,这两发获得的 X 射线辐射功率均为同类型负载中的最低值.

4.2. 单层丝阵

表 4 列出了 Angara-5 实验中五种类型单层丝阵负载的内爆辐射参数情况.

表 4 五种单层丝阵负载的辐射参数对比(除 AS1 丝阵负载的直径为 18 mm 外,其他四种负载的直径均为 12 mm)

负载	丝数量 N/丝直径 D/ μm	平均电流/MA	平均功率/TW	平均电流上升速度/ $\text{kA} \cdot \text{ns}^{-1}$
AS5	60/6	2.9	2.6	44.9
AS2	48/5	2.7	2.9	41.3
AS3	60/5	2.9	3.1	44.7
AS4	90/5	3.2	4.7	51.1
AS1	128/4.2	4.2	5.0	63.7

4.2.1. 只改变单丝直径(5 μm @6 μm),丝数量相等,丝间距不变(0.63 mm)

结果与强光一号实验一致^[10],5 μm 丝阵负载(AS3)相比 6 μm 丝阵负载(AS5)具有更好的内爆品质.如图 3 所示,在同等的 2.9 MA 负载驱动电流条件下前者的平均辐射功率达到 3.1 TW,比后者 2.6 TW 的平均辐射功率高出约 20%.

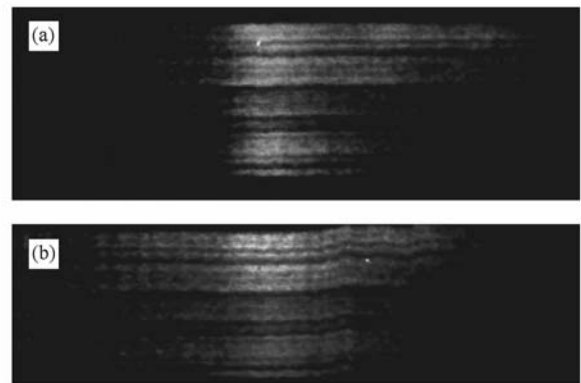


图3 5 两种单丝直径单层丝阵的一维轴向内爆辐射图像对比 (a)图表现出更好的轴向内爆同步性和均匀性,图中横坐标一格为 10 ns,纵坐标一格为 4.96 mm. (a) 4069 发,5 μm /2.7 MA/3.2 MA; (b) 4070 发,6 μm /3.2 MA/2.7 TW

4.2.2. 单丝直径(5 μm)保持不变,增加丝数量以改变丝间距

在驱动器电磁储能不变的条件下,随着丝间距从 0.79 mm 减小到 0.42 mm,流过负载的峰值电流随之从 2.7 MA 增加到 3.2 MA.当丝间距接近单丝

内爆向壳层内爆模式转换的临界值时(0.63 mm→0.42 mm),X 光辐射功率迅速提高,增长幅度超过 50% (3.1 TW→4.7 TW),其中,采用 0.42 mm 丝间距负载的 4408 发次获得了 5.3 TW ± 1.0 TW 的峰值辐射功率,这一参数创造了同等驱动电流条件下单层丝阵负载 X 光辐射功率的最高纪录.

4.2.3. 线质量不变,改变丝单丝直径(4.2 μm@5 μm),同时改变丝数量和丝阵直径,保持丝阵中相邻丝的间距相当(0.42 mm@0.44 mm)

采用更细的 4.2 μm 超细钨丝在辐射功率上没有表现出显著的优势,平均辐射功率仅提高了约 6%,其中原因在于钨丝质量分布的初始扰动(δ m/m,也就是 RT 不稳定性增长的“种子”^[8])比 5 μm 钨丝大.但是前者在驱动器电磁储能相等的条件下负载电流达到了 4.2 MA,比后者的 3.2 MA 提高了超过 30%,同时受益于更大的丝阵初始半径,前者可以因此而获得远大于后者的等离子体内爆速度,这一特点对于黑腔的优化非常有利.

4.2.4. 等负载质量的单、双层丝阵对比

在双层丝阵等离子体的内爆过程中,外层丝阵等离子体与内层丝阵的碰撞整形作用是抑制 RT 不稳定性增长的有效措施,可以显著提高等离子体聚心时的时间同步性和轴向均匀性,优化辐射分布,提高 X 射线辐射功率.表 5 和图 4 是同样由 60 根 6 μm 钨丝组成的单、双层丝阵的辐射参数和辐射图像对比.

表 5 单层与双层丝阵的内爆同步性及辐射参数对比(两种负载均由 60 根 6 μm 钨丝组成)

负载	构型	平均辐射脉宽/ns	辐射前沿平均涨落/ns	平均辐射功率/TW
AS5	单层	10.1	1.96	2.6
AD4	双层	10.7	1.47	3.9

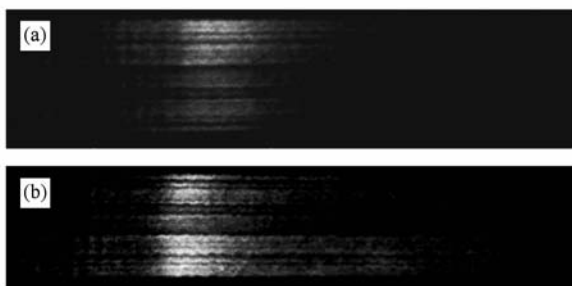


图 4 单层和双层丝阵等离子体的一维轴向内爆辐射图像对比. 双层丝阵表现出更好的轴向内爆同步性和均匀性,图中横坐标一格为 10 ns,纵坐标一格为 4.96 mm. (a) 4064 发,3.0 MA/2.8 TW; (b) 4072 发,2.9 MA/3.4 TW

4.3. 双层丝阵

双层丝阵的内爆物理过程与单层丝阵有较大的差异,内层对外层内爆等离子体位型的整形作用使得双层丝阵负载在不稳定性抑制上具有显著的优势,是进行黑腔设计的首选丝阵构型.

表 6 列出了 Angara-5 实验中六种类型双层丝阵负载的内爆辐射参数情况,图 5 则给出了负载的辐射功率与电流上升速率之间的关联性,电流上升速率提高,X 射线辐射功率表现出增加的趋势.

表 6 六种双层丝阵负载的辐射参数对比(其中 4.2 μm 钨丝负载的直径为 18 mm(AD1)和 20 mm(AD2),其他三种负载的直径均为 12 mm)

负载	丝数量 N/丝直径 D/μm	平均电流/MA	平均功率/TW	平均电流上升速度/kA·ns ⁻¹
AD1	86,43/4.2	3.9	4.4	60.9
AD2	86,43/4.2	4.4	5.3	65.2
AD3	60,30/5	2.8	3.6	44.9
AD4	40,20/6	2.9	3.9	48.7
AD5	60,30/6	4.1	4.6	64.8
AD6	30,60/6	3.6	4.3	61.7

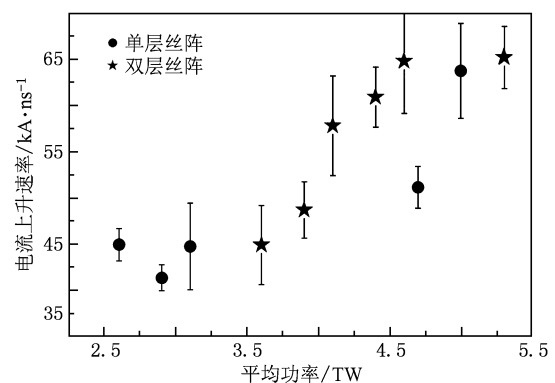


图 5 单、双层丝阵负载的内爆辐射功率与电流上升速率的关联性,图中包含了 Angara-5 实验中 11 种类型负载的实验统计数据

4.3.1. 只改变单丝直径(5 μm@6 μm),内外层丝数量均相等(60 根)

与单层丝阵的实验结果不同的是,5 μm 钨丝丝阵(AD3)在峰值负载电流、峰值辐射功率上均弱于 6 μm 钨丝丝阵(AD5),主要原因可能在于两个方面:一是后者的负载电流大,电流上升速率快,不稳定性发展时间短;二是纳秒分幅相机测试结果显示前者内、外层丝阵等离子体内爆不同步,内层丝阵提前内爆聚心,X 射线辐射功率时间波形上出现

两个间隔约为 10 ns 的辐射峰,导致峰值辐射功率下降,如图 6 所示.文献[12]给出了初步解释,这是由于内层丝阵电感相对外层较低,电流过早地通过内层,导致内层提前内爆,内外层等离子体的辐射峰在时间上分离,从而大大降低了峰值辐射功率.

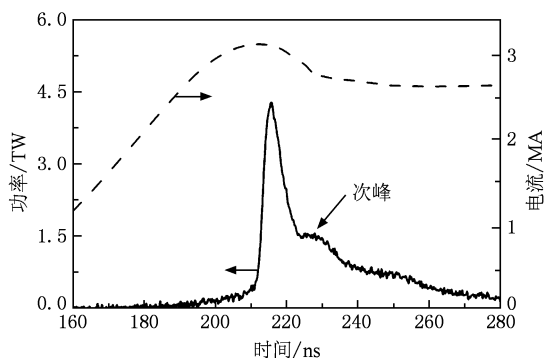


图6 外层40内层20根6 μm钨丝丝阵的X射线辐射功率时间分布 内外层辐射峰在时间上分离,次辐射峰出现在主辐射峰后10 ns

4.3.2.4.2 μm 钨丝阵列,改变丝阵直径

提高等离子体的内爆动能是进行黑腔设计的首要基础.采用4.2 μm细钨丝,在负载线质量基本不变的条件下可以增加丝数量,构建大直径的丝阵负载,是提高等离子体内爆速度的一种可行途径.实验结果显示4.2 μm钨丝的两组负载获得的最大速度均大大超过了5和6 μm钨丝负载,同时还解决了5 μm钨丝负载内、外层等离子体不同时聚心的问题,实现了内爆动能的提高和内爆辐射的初步优化.

在4668发实验中使用20 mm直径的AD2负载获得5.6 TW ± 1.1 TW的X射线辐射功率,创造了Angara-5装置上的历史最高纪录.图7(a)给出了该发次实验中测量获取的X射线内爆轨迹,其最大径向运动速度达到1.4 × 10⁸ cm/s,远高于18 mm直径负载(AD1)的最大速度7 × 10⁷ cm/s.

在内爆动力学模式上,两种丝阵直径的负载也表现出了一定的区别:20 mm直径的负载在内外层等离子体相互作用时内层丝阵直径与初始状态相比没有大的变化,电流绝大部分从外层丝阵流过,而18 mm负载在此刻内层已被箍缩至初始直径的一半,内层已有较多份额的电流分流;共同之处是内外层丝阵的融合均出现在相对X射线峰-6 ns时刻,此时在互感的作用下内外层丝阵电流迅速切换^[13,14],同时径向内爆运动速度激增,20 mm直径

丝阵从1.3 × 10⁷ cm/s猛增到1.4 × 10⁸ cm/s,15 mm丝阵则由于加速距离短,速度增幅只有20 mm丝阵的一半.

4.3.3.4.2 μm 钨丝阵列与6 μm 钨丝阵列

AD2与AD5分别是4.2与6 μm两大类钨丝双层丝阵中较优化的负载结构,电流上升速率比其他相同钨丝直径的负载均高出10%以上,辐射功率同时也都高出约20%.但这两种负载在内爆物理过程中表现出了较明显的差别,后者内外层丝阵的作用过程持续时间较长,辐射区半径在约3 ns的时间内保持不变,形成原因在于拖尾分布的外层等离子体(trailing mass)^[14],电流转换过程完成后6 μm丝阵的径向内爆运动速度及速度增幅均比前者低50%以上(见图7(b)),4.6 TW的平均辐射功率也比前者的5.3 TW低约15%.

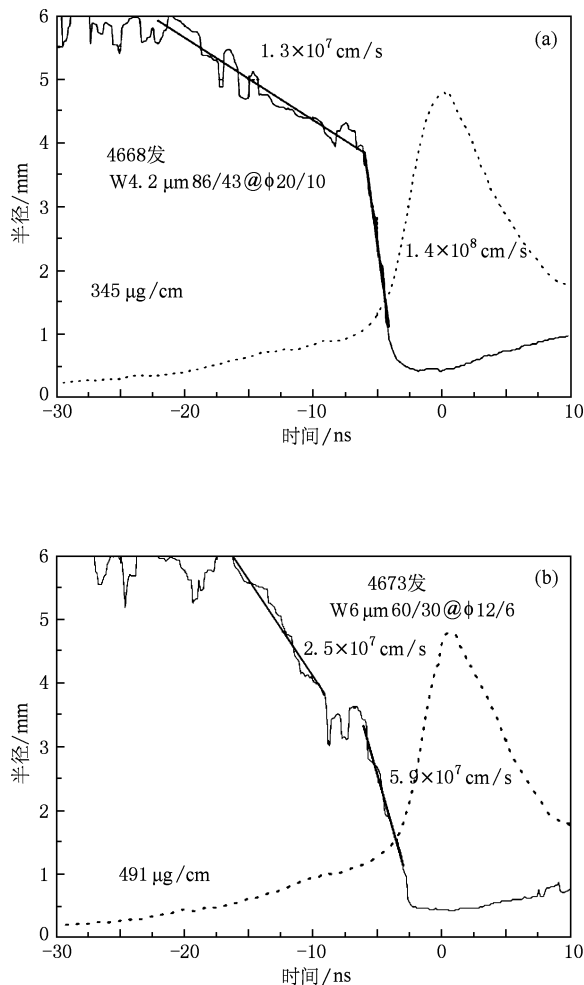


图7 双层丝阵等离子体X射线辐射半径随内爆时间的变化过程,虚线为X射线辐射功率波形 (a) 4.2 μm钨丝,20 mm丝阵直径,外86内43,峰值功率5.6 TW,为历史最高值; (b) 6 μm钨丝,外60内30双层丝阵,最大速度为5.9 × 10⁷ cm⁻³

4.3.4. 交换内、外层丝阵质量分配比例

AD5 和 AD6 两种负载交换了内、外层丝阵质量分配比例,外层更稀疏,内层更紧密. 实验结果显示两种负载的内爆动力学过程非常相似,区别仅在于稀疏的外层丝阵的拖尾质量分布更广,在其影响下后者内外层丝阵碰撞停滞的过程也就是辐射区半径保持不变的时间持续了更长的 10 ns,同时后者的电流上升时间仅为 58 ns,比包括 AD5 在内的其他所有类型负载都要低,这一特性对于缩短 RT 不稳定性增长时间、抑制不稳定性影响从而提高辐射功率是非常有利的,也是最终的 X 射线辐射功率没有产生明显差异的主要原因.

5. 结 论

本文通过钨丝直径和丝阵结构参数的优化匹配、负载电极及丝阵初始状态的良好控制实现了负载 X 光辐射功率的实验优化,在 3—4 MA 电流的驱动下,单、双层丝阵负载分别获得 $5.3 \text{ TW} \pm 1.0 \text{ TW}$ 和 $5.6 \text{ TW} \pm 1.1 \text{ TW}$ 的峰值辐射功率,为历史最高记录.

致谢:Angara-5 和强光一号装置全体运行人员为实验的顺利进行提供了保障,中国工程物理研究院激光聚变研究中心为实验制作了负载,在此表示感谢.

- [1] 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 1998 *Phys. Plasmas* **5** 2105
- [2] Deeney C, Douglas M R, Spielman R B, Nash T J, Peterson D L, Eplattener P L, Chandler G A, Seamen J F, Struve K W 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4883
- [3] Hammer J H, Tabak M, Wilks S C, Lindl J D, Bailey D S, Rambo P W, Toor A, Zimmerman G B, Porter J L 1999 *Phys. Plasmas* **6** 2129
- [4] Vesey R A, Herrmann M C, Lemke R W, Desjarlais M P, Cuneo M E, Stugar W A, Bennett G R, Campbell R B, Christenson P J, Mehlhorn T A, Porter J L, Slutz S A 2007 *Phys. Plasmas* **14** 056302
- [5] Xu R K, Li Z H, Yang J L, Xu Z P, Ding N, Guo C, Jiang S L, Ning J M, Xia G X, Li L B, Song F J, Cheng J C 2005 *Chin. Phys.* **14** 1613
- [6] Ning J M, Jiang S L, Xu R K 2006 *High Power Laser and Particle Beams* **18** 1215 (in Chinese) [宁家敏、蒋世伦、徐荣昆 2006 强激光与粒子束 **18** 1215]
- [7] Yang J L, Li Z H, Xu R K 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 234 (in Chinese) [杨建伦、李正宏、徐荣昆 2007 强激光与粒子束 **19** 234]
- [8] 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
- [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] Wang Z, Xu R K, Yang J L, Hua X S, Li L B, Xu Z P, Ning J M, Song F J 2007 *Chin. Phys.* **16** 772
- [11] Zhang F Q, Li Z H, Xu Z P, Xu R K, Yang J L, Cuo C, Xia G X, Chen J C, Song F J, Ning J M, Wang Z, Xue F B, Li L B, Qin Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2058
- [12] 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]
- [13] Terry R E, Davis J, Deeney C, Velikovich A L 1999 *Phys. Rev. Lett.* **83** 4305
- [14] Cuneo M E, Sinars D B, Bliss D E, Waisman E M, Poter J L, Stygar W A, Lebedev S V, Chittenden J P, Sarkisov G S 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 225003

X-ray radiation power optimization in 1 MA to 4 MA wire-array implosions *

Wang Zhen^{1)†} Li Zheng-Hong¹⁾ Xu Rong-Kun¹⁾ Yang Jian-Lun¹⁾ Ding Ning²⁾ Xu Ze-Ping¹⁾
Guo Cun¹⁾ Ning Cheng²⁾ Ning Jia-Min¹⁾ Jiang Shi-Lun¹⁾ Zhang Fa-Qiang¹⁾ Xia Guang-Xin¹⁾
Li Lin-Bo¹⁾ Ye Fan¹⁾ Qin Yi¹⁾ Xue Fei-Biao¹⁾ Chen Jin-Chuan¹⁾

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

2) (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

(Received 20 November 2009; revised manuscript received 23 April 2010)

Abstract

Tungsten wire array implosions driven by 1 MA to 4 MA current were experimentally investigated. X-ray radiation power was improved through load parameters optimization, electrode structure improvement and well control of initial array conditions. The maximum powers of 5.3 ± 1.0 TW and 5.6 ± 1.1 TW, the highest at the 3 MA to 4 MA current level up to now, were measured in the single array and the double array implosions, respectively.

Keywords: Z-pinch, wire-array X-ray radiation, optimization

PACS: 52.59.Qy, 52.70.La

* Project supported by the Key Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10035030, 10635050).

† E-mail: wangzhen@tsinghua.org.cn