

强光一号兆安电流钨丝 X 箍缩实验研究*

吴坚^{1)2)†} 王亮平²⁾ 李沫²⁾ 吴刚²⁾ 邱孟通²⁾ 杨海亮²⁾
李兴文¹⁾ 邱爱慈¹⁾²⁾

1)(电力设备与电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

2)(强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 西安 710024)

(2013年5月30日收到; 2013年10月14日收到修改稿)

为了获得更高亮度的 X 射线点源, 在“强光一号”装置上开展钨丝 X 箍缩实验研究. 基于能量平衡方程, 估算了 1 MA 电流热斑等离子体平衡半径为 1—10 μm . 实验中, 测试钨丝直径为 25—100 μm , 丝根数为 2—48, 负载线质量为 0.18—6.9 mg/cm; 负载电流峰值为 1—1.4 MA, 10%—90% 前沿为 60—70 ns. “强光一号”装置上匹配的 X 箍缩负载为 30 或 32 根 25 μm 钨丝 X 箍缩, 这种负载一定概率产生单个脉冲 X 射线辐射, 辐射时刻位于电流峰值附近, 典型参数为 keV X 射线脉宽 1 ns, 辐射功率 35 GW, 产额 40 J, 热斑尺寸 $\sim 30 \mu\text{m}$. 然而, 兆安电流 X 箍缩通常产生多个热斑及多个脉冲 X 射线辐射. keV 能段首个脉冲 X 射线辐射时刻与负载线质量正相关, 并受到负载丝直径的影响. 多个 X 射线脉冲可能由二次箍缩和局部箍缩产生, 多个热斑可能由交叉点处做 Z 箍缩的长波长扰动和短波长扰动引起. 与百千安电流 X 箍缩相比, 兆安电流 X 箍缩热斑亮度更高, 但 X 射线辐射脉冲的单一稳定性还有待于进一步改善.

关键词: X 箍缩, 热斑, 兆安电流

PACS: 52.59.Qy, 52.80.Qj

DOI: 10.7498/aps.63.035205

1 引言

X 箍缩(X-pinch)是从丝阵 Z 箍缩演变而来的一种产生脉冲 X 射线的构型, 两根或多根金属细丝交叉相交于一点成“X”形, 安装于脉冲大电流装置($dI/dt > 1 \text{ kA/ns}$)的阴阳极之间^[1,2]. 在交叉点处, 电流汇聚, 引起该区域等离子体快速演化. 在不稳定性和辐射坍塌等机理的共同作用下, 交叉点处等离子体可形成一个或数个极小尺寸的脉冲 X 射线辐射区域, 这些区域称为热斑或焦斑. 在百千安电流下, X 箍缩表现出优异的热斑等离子体参数. 基于美国康奈尔大学 XP 装置, 在 $\sim 260 \text{ kA}$ 电流下, X 箍缩热斑直径为 $1.2 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 、辐射脉宽 $\sim 10 \text{ ps}$, 电子温度 $\sim 1 \text{ keV}$ (Ti, Mo)、离子密度 $\sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$, keV X 射线辐射产额为 10—100 mJ. X 箍缩 X 射线源具有高亮度、窄脉冲($\sim 1 \text{ ns}$)、小焦斑

($\leq 10 \mu\text{m}$)的特性, 且能量转化效率高, 是一种有效的脉冲 X 射线点源, 非常适合于对高密度、快演化的物理过程进行 X 射线照相^[3,4]. 国内, 中国工程物理研究院“阳”加速器 X 箍缩(520 kA)^[5,6]、清华大学 PPG-1 装置($\sim 400 \text{ kA}$)^[7]也先后开展了百千安电流下 X 箍缩实验研究.

虽然百千安电流下 X 箍缩表现出优异的点源特征, 但是其 keV X 射线辐射总产额为 0.01—0.1 J^[8], 与美国圣地亚国家实验室 ZR 装置(26 MA, 100 ns)上的 Z-Beamlet 激光 X 射线源 0.1—1 J 的单能 X 射线辐射输出还有一定的差距. 然而, Z-Beamlet 从激光能到单能 X 射线的能量转换效率为 $\sim 10^{-3}$, 电能到 X 射线能的转换效率只有 $\sim 10^{-7}$, 且装置规模庞大、造价高、技术复杂^[9]. 依据 Z 箍缩负载的电流-产额定标关系, 能否在更大电流下获得更高亮度的 X 射线点源以用于大型装置稠密等离子体的诊断, 开始受到国内外相关研究单位

* 国家自然科学基金(批准号: 51237006)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: jxjawj@gmail.com

的重视. 美国内华达大学 ZEBRA 装置 (1.2 MA, 100 ns)^[10]、康奈尔大学 COBRA 装置 (1.0 MA, 95—200 ns)^[11]、俄罗斯库尔恰托夫研究所 S-300 (1.3—2.3 MA, 100 ns) 加速器^[12]、美国圣地亚实验室 Saturn 装置 (6.0 MA, 50 ns)^[13] 先后开展了兆安电流 X 箍缩实验研究. 然而上述实验结果表明, 兆安电流 X 箍缩演化过程更加复杂, 通常表现为多个热斑及多个脉冲 X 射线辐射, 且与驱动器参数密切相关. 除了上述点投影照相应用外, 兆安电流下 X 箍缩可能产生更加极限参数 (温度、密度) 的热斑等离子体, 是高温高密等离子体关心的重要内容^[13], 也是认识 Z 箍缩负载热斑辐射的一种手段.

为了深入认识兆安电流下 X 箍缩的演化, 掌握 X 箍缩多个热斑及多次脉冲辐射的性质, 我们基于“强光一号”装置 Z 箍缩实验平台, 开展兆安电流下的钨丝 X 箍缩实验研究. 本文中报道对 X 箍缩热斑平衡半径的物理分析, 以及实验安排、匹配负载典型结构、多次脉冲 X 射线辐射以及多个热斑的实验规律, 可增进对兆安电流下 X 箍缩多个热斑辐射的认识, 为进一步优化奠定基础, 此外对认识 Z 箍缩等离子体中的热斑辐射也具有借鉴意义.

2 X 箍缩热斑物理分析

热斑等离子体中的能量来源包括磁压做功和欧姆加热, 通过辐射损失能量. 单位长度等离子体的磁压功率 P_{mag} 为

$$P_{\text{mag}} = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \ln \frac{a_{\text{ini}}}{a}, \quad (1)$$

式中 μ_0 为真空磁导率, I 为负载电流, a_{ini} 为交叉点处初始半径, a 为热斑半径.

热斑单位长度欧姆加热功率 P_{ohm} 为^[14]

$$P_{\text{ohm}} = \eta_{\perp} \frac{I^2}{\pi a^2}, \quad (2)$$

式中 η_{\perp} 为 Spitzer 电阻率,

$$\eta_{\perp} = 1.0 \times 10^{-4} Z_{\text{eff}} \ln \Lambda T_e^{-3/2},$$

T_e (eV) 为电子温度, Z_{eff} 为平均电离度, $\ln \Lambda$ 为库仑对数.

利用原子物理计算程序 FLYCHK^[15], 计算局域热力学平衡下 (LTE) 下, 不同 T_e 和离子密度 n_i (cm^{-3}) 时, 钨等离子体的平均电离度 Z_{eff} . 从图中可以看出, 平均电离度随着电子温度的增加而增大, 随着密度的增大而减小.

热斑是一类高温高密度等离子体, 具有很强的光学不透明度, 辐射谱由线状谱和连续谱组成, 情

况非常复杂. 这里只考虑理想情况, 热斑为完全热力学平衡等离子体, 其辐射谱为黑体, 辐射区为半径为 a 的柱面辐射. 当等离子体辐射等效为辐射温度 T_R 的黑体辐射^[16] 时, 等离子体单位长度辐射功率为

$$P_{\text{BB}} = \sigma T_R^2 2\pi a, \quad (3)$$

式中 T_R (eV) 为黑体温度, $T_R = T_e$, σ 为斯特潘-玻尔兹曼黑体辐射常数, $\sigma = 1.02 \times 10^9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{eV})$.

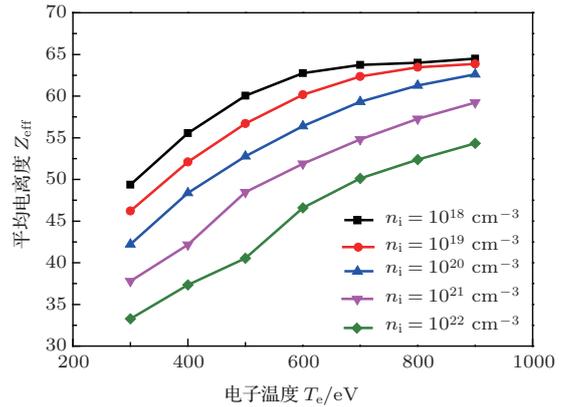


图1 局域热力学钨等离子体的平均电离度与电子温度和离子密度的关系

考虑定常电流 $I = 1 \text{ MA}$, 通常 a_{ini} 为 $\sim 0.5 \text{ mm}$, 热斑尺寸为 $\sim \mu\text{m}$, 由 (1) 式估算得 $P_{\text{mag}} \sim 10^5\text{—}10^6 \text{ W/m}$, 磁压功率 $P_{\text{mag}} \ll$ 欧姆加热功率 $P_{\text{ohm}} (\sim 10^{16}\text{—}10^{18} \text{ W/m}$, 图 2), 其影响可以忽略. 不同 T_e 时, P_{ohm} 和 P_{BB} 随着热斑半径 a 的变化关系见图 2, 从图中可以看出, P_{BB} 正比于热斑半径, 而 P_{ohm} 随着半径的增加而减小. 给定温度下, P_{BB} 与 P_{ohm} 的交点表示平衡热斑的平衡半径 a_c . 当热斑半径大于 a_c 时, $P_{\text{BB}} > P_{\text{ohm}}$, 辐射损失超过馈入能量, 热斑可被进一步压缩 (辐射坍塌). 由图 2 可知, a_c 随着 T_e 增大而减小, 为 1—10 μm 量级.

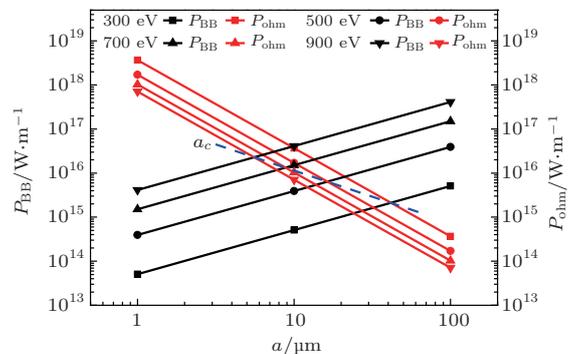


图2 热斑黑体辐射线功率和欧姆加热线功率与热斑半径的关系

3 实验描述

兆安电流X箍缩实验基于“强光一号”Z箍缩实验平台开展。“强光一号”装置是一台低阻抗强流脉冲加速器^[17],主体由一台微秒级直线型脉冲变压器(LTD)及多段低阻抗水介质传输线组成,加速器初级电容储能为295 kJ,馈入真空二极管负载段能量为~80 kJ.实验中,X箍缩负载电流峰值为1—1.4 MA,10%—90%前沿为60—70 ns.

钨是一种高熔点高Z元素,容易形成小尺寸热斑,本实验主要针对钨丝X箍缩负载开展.负载中使用的钨丝直径为25—100 μm ,丝根数为2—48,负载线质量为0.18—6.9 mg/cm.安装后的X箍缩负载见图3,它是由柱形丝阵Z箍缩的阳极相对阴极旋转~190°而成.X箍缩负载的长度为~20 mm,交点处的放大图见图3(d),交叉区域的轴向

长度小于1 mm,径向宽度小于0.5 mm.

实验中的诊断测试仪器可分为三类:脉冲电参数测量、脉冲辐射测量和图像诊断.罗科夫斯基线圈测量负载处电流^[18].闪烁体光电管记录等离子体总辐射,X射线二极管(X-ray vacuum Diodes, XRD)^[19]、金刚石光导探测器(diamond PhotoConducting Detector, PCD)和硅二极管(Si-pin)与X射线滤片的组合可以测量不同能段软X射线辐射的功率及产额.其中2.5 μm Mylar滤片选通>100 eV的光子;15 μm 聚乙烯+2.5 μm Mylar+0.4 μm 铝构成复合滤片(以下简称为K层滤片),选通>1 keV的光子.滤片-XRD探测器的时间分辨为~0.5 ns.X箍缩的演化图像由一台8分幅XUV(Extreme ultraviolet)相机记录,相机前置2.5 μm 厚Mylar滤片,空间分辨为~0.7 mm,时间分辨为~2 ns^[20].X箍缩热斑图像由时间积分的针孔或狭缝阵列记录.

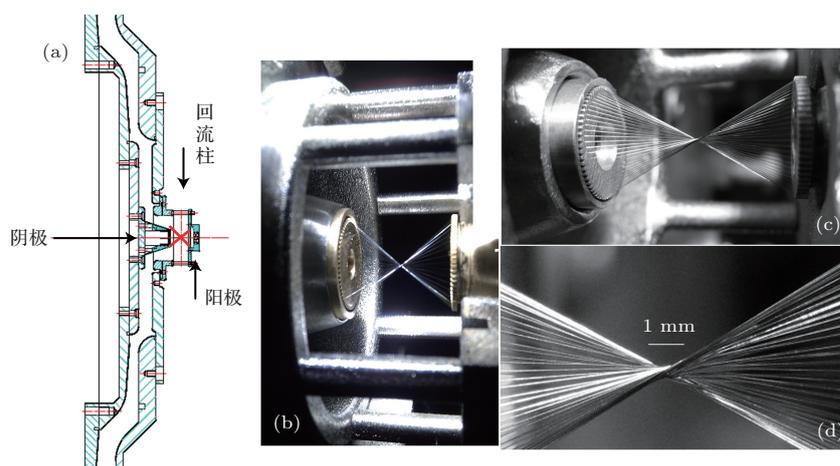


图3 X箍缩负载 (a) 负载区装配图; (b), (c) 安装好的单层X箍缩负载; (d) 为(c)交叉点区域的局部放大图

4 实验结果

4.1 匹配X箍缩负载

实验结果表明,“强光一号”装置的匹配负载为30或32根直径25 μm 钨丝X箍缩负载,记为32(丝根数)-25 μm (丝直径)-W(丝材料).该负载共测试8发次,除第11033发负载在放电前失效,有三发实验[第09084发(30—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$)、第10064发(30—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$)和第11030发(32—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$)]产生了单个显著的脉冲X射线辐射.负载电流和keV X射线辐射波形如图4所示,X射线辐射时刻位于电流峰值处,辐射时刻极差为12 ns XRD幅值为 30 ± 3 V.

需要指出的是,这三发实验分别是在2009年、2010年和2011年开展的,下面具体分析该负载的X射线辐射及等离子体演化特性.

第11030发(32—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$)X箍缩X射线辐射波形见图5.K层滤片(>1 keV)的Au阴极XRD和Al阴极XRD探测器都记录到X射线主辐射峰 P_1 (图5(a)),它位于整个辐射过程的最前面,脉冲前沿为0.4 ns,半高宽为1 ns.此后有两个较弱的辐射峰(P_2, P_3),前沿为2 ns,脉宽为3 ns.不同能段探测器记录到的辐射波形差异很大,见图5(b).Mylar滤片(>100 eV)XRD探测器可以显著地观察到 P_2, P_3 辐射峰,而闪烁体光电管波形为一个涵盖 P_1 — P_3 的单个辐射峰,对应于 P_3 位置.根据探

测器灵敏度, 可以估算X射线的辐射功率及产额. 由闪烁体光电管波形, 可以估算X箍缩总辐射产额为10 kJ量级. 在P₁峰处, 总辐射功率为0.1 TW, ~100 eV X射线功率为45 GW, keV X射线功率为35 GW, 产额为40 J.

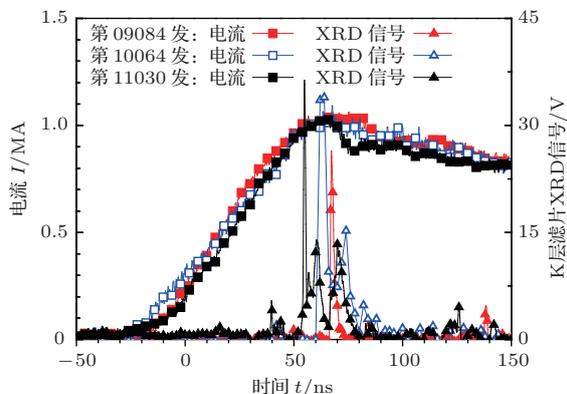


图4 第09084 (30—25 μm·W)、第10064 (30—25 μm·W)、第11030 (32—25 μm·W) X箍缩负载电流及keV X射线辐射波形

分幅相机记录的X箍缩演化图像见图6, 图中可以清晰分辨出负载的“X”构型、交叉点区域和轴线处的射流等离子体. P₁, P₂峰辐射时刻位于图6(b), (c)之间, P₃峰位于(d), (e)之间. 图中的杂散亮点是X箍缩辐射的高能光子(~100

keV), 直接穿透分幅相机针孔阵列的基底(厚度~100 μm铜), 照射到金微带上造成的. 软X射线辐射主要集中在交叉处1—2 mm的区域内. 等离子体射流沿轴向方向高度准直, 径向宽度为~1 mm, 且随着远离交点位置而略微膨胀. 当射流与电极碰撞时, 可以观察到电极表面的辐射亮度增强, 电极对应位置也可以观察到烧蚀出现的深坑. X射线辐射后, 射流强度逐渐减弱直至消失, 而腿部金属丝仍清晰可见. 交叉点处等离子体通道没有断裂, 而只观察到显著地径向膨胀. 等离子体通道直径由(c)中的2.85 mm膨胀至3.75 mm(f), 径向速度为~2.6 cm/μs. 离子声速c_s^[21]为

$$c_s [\text{m/s}] = 9.79 \times 10^3 (\gamma Z_{\text{eff}} T_e [\text{eV}] / A), \quad (4)$$

其中γ=5/3, A为钨原子量(184). 由膨胀速度可以计算得Z_{eff}T_e为293 eV. 基于FLYCHK计算得到的电离分布^[15], 可以估计得到电子温度T_e~25 eV, Z_{eff}~12. 若取负载电流为1 MA, 由Bennett平衡式

$$(Z_{\text{eff}} + 1) N_i [1/\text{m}] T = 3.12 \times 10^{23} I [\text{MA}]^2. \quad (5)$$

估计得到离子线密度N_i~9.6×10²⁰/m, 对应的线质量为质量2.9 mg/cm(初始质量3.2 mg/cm), 即~90%的初始质量仍停留在交叉点附近.

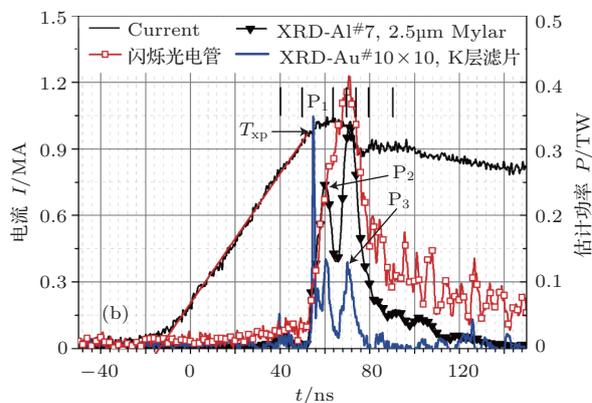
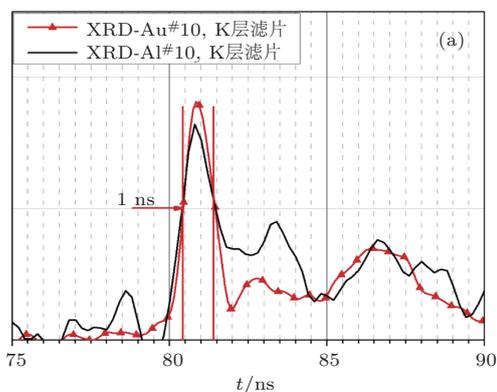


图5 第11030发(32—25 μm·W) X箍缩负载电流及X射线波形 (a) keV X射线纳秒脉冲辐射波形; (b) 不同能段探测器波形

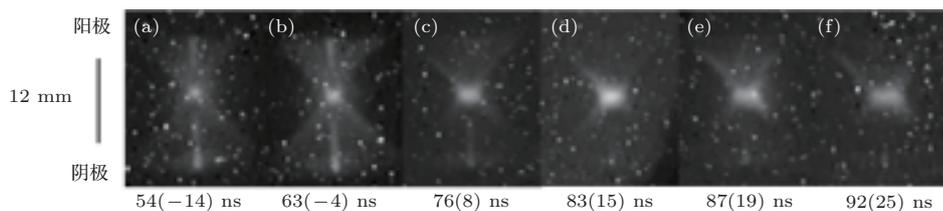


图6 第11030发(32—25 μm·W) X箍缩XUV分幅相机图像

针孔照相给出的X箍缩热斑图像见图7(a), 针孔前置25 μm厚的钛滤片, 主要选通2.5—5 keV能段X射线辐射. 图中可以清楚地观察到出负载阳极侧的“X”构型以及热斑, 还可以隐约地辨识出轴线处的射流等离子体. 热斑为交叉点处的“黑点”, 是keV X射线的主要辐射区域. 在针孔直径50 μm的图像中, 热斑分为H₁和H₂两部分, 相距~1 mm. 热斑H₁靠近阴极侧, 成长条形; 热斑H₂靠近阳极侧, 成圆形. 当针孔直径为15 μm时, 热斑尺寸~30 μm, 从针孔图像中仍可分辨出上述热斑区域. 然而当针孔直径为80 μm时, 热斑图像为相对完整的直径130—180 μm的圆. 我们认为: 此时热斑尺寸小于针孔直径, 该图像不是热斑的针

孔图像(放大比1:1), 而是热斑对针孔的点投影图像(放大比2:1). 由此, 可以进一步确认热斑尺寸为30—50 μm. 狭缝图像见图7(b), 滤片同样为25 μm厚的钛滤片, 狭缝方向与负载轴向垂直, 可以分辨热斑沿微Z箍缩轴线分布. 从图中可以看出, 每条狭缝对应着两个条纹, 对应着针孔图像中的两个热斑. 实验测量结果与图2计算结果相符合.

上述XUV分幅图像与keV针孔图像都能清楚地辨识负载“X”构型. XUV相机记录到的交叉点处微Z箍缩长度为~1 mm, 与keV针孔图像中的热斑H₁, H₂的距离符合. 然而, 它们响应的X射线能段不同, 不同部位的相强度差异很大.

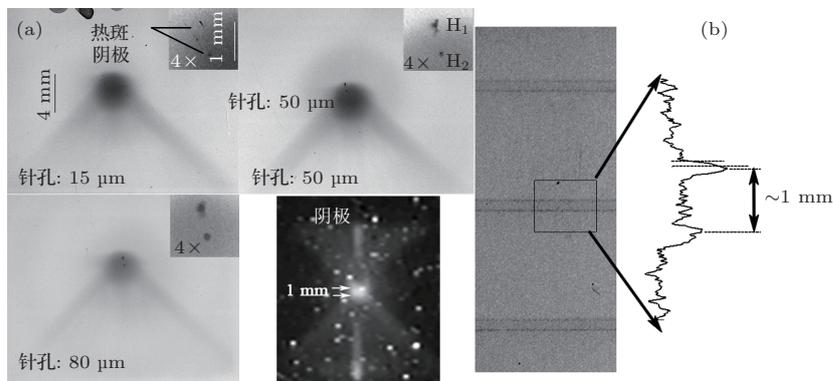


图7 第11030发(32—25 μm·W)X箍缩的针孔狭缝相机图像, 滤片为25 μm Ti

“强光一号”装置的匹配负载为30(或32)根直径25 μm钨丝X箍缩负载, 当产生单个脉冲X射线辐射时, X射线辐射时刻位于电流峰值处, X射线脉宽~1 ns, keV X射线辐射功率为35 GW, 产额为40 J, 热斑尺寸为~30 μm. 然而, 该负载尚不能稳定实现单个脉冲X射线辐射.

4.2 首个脉冲X射线辐射时刻

兆安电流驱动下的X箍缩通常表现为多次脉冲辐射及多个热斑. 这里的脉冲X射线辐射是指keV能段的纳秒脉宽X射线辐射, 由热斑等离子体产生. 其中首个X射线辐射对应着负载从初始冷态的演化过程, 最能表征负载等离子体的演化快慢, 通常具有最小的热斑尺寸和最硬的辐射能谱^[13]. 因此我们定义归一化量 T_N 来表征首个X箍缩辐射与负载电流的相对关系,

$$T_N = T_{xp}/T_{tr}, \quad (6)$$

其中 T_{xp} 为电流起始至首个热斑X射线辐射的时间; T_{tr} 为负载电流上升时间. 由于电流波形受到预脉冲电流和干扰信号的影响, 电流0%—100%的上升时间由电流20%—80%的位置线性外推得到. 实验中负载电流基本一致, T_N 值与X箍缩负载参数密切相关, 并受到等离子体不稳定性的影响. 其中最重要的参数为负载线质量 M_1 为

$$M_1 = \pi N \rho D^2 / 4, \quad (7)$$

式中 N 为丝根数, ρ 为丝密度, D 为丝直径. 图8为 T_N 与负载线质量 M_1 的实验曲线. 图中包含了2009—2011年所有有效发次的实验数据, 每个数据点对应于一发实验结果. 实验中测试的最小负载线质量为0.18 mg/cm (2—25 μm·W X箍缩, 第11036发, 其首个X射线辐射时刻 T_N 为0.21, 对应的负载电流为0.26 MA. 从图可以看出: 首个X射线辐射时间随着负载线质量的增加而增加. 针对匹配负载的质量~3.0 mg/cm, 我们进一步测试了不同丝直径的负载构型, 实验结果表明: 相同负载线

质量下丝直径越大, 丝根数越小, 热斑辐射的时刻相对较晚.

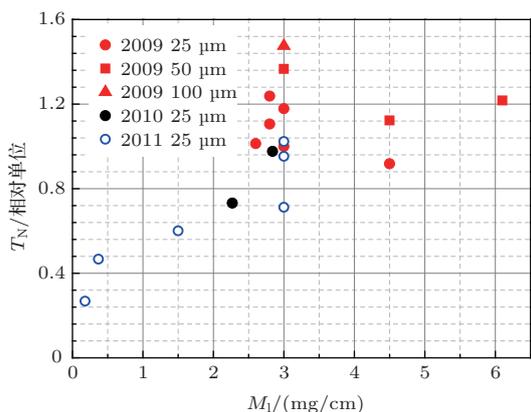


图8 X 箍缩负载归一化的首个 X 射线辐射时刻 T_N 与负载线质量的关系

参照丝阵 Z 箍缩的演化过程, X 箍缩演化主要可分为“核冕”等离子体形成, 丝核融蚀、射流, 微 Z 箍缩形成及辐射坍塌四个阶段. 其中“核冕”等离子体形成和辐射坍塌在 ~ 10 ns 时间内就可完成了. 丝核融蚀、射流和微 Z 箍缩的形成承担了 X 箍缩演化的绝大部分时间. 负载线质量越大, 等离子体演化所需的时间越长; 相同负载线质量条件下, 丝数越少、丝直径越大、丝核融蚀时间越长, 首个热斑辐射出现的时刻越晚.

4.3 X 箍缩多次脉冲 X 射线辐射

兆安电流下 X 箍缩通常产生多个脉冲 X 射线辐射, 与上述首个辐射不同, 实验中后续辐射峰的出现时刻没有显著的定量规律, 但总体可分为两大类情况. 一方面, 在首个 X 射线辐射后, 后续电流继续驱动等离子体演化, “二次箍缩”产生新的热斑, 这种情形在轻质量 X 箍缩负载中较显著. 另一方面, 由于等离子体演化的不均匀性, 可能出现局部等离子体演化过快的现象, 在显著早于图 8 中预期的时刻, “局部箍缩”产生热斑辐射. 这种情形在多丝数、小直径的 X 箍缩负载中较显著.

由此可见, 为了使 X 箍缩产生单个脉冲 X 射线辐射, 需选择与驱动电流相匹配的负载质量(即 4.1 节中的匹配 X 箍缩负载), 使其首个辐射脉冲位于电流峰值时刻, 以尽量避免“二次箍缩”产生热斑. 同时, 还应尽可能地抑制热斑形成过程中等离子体的不均匀演化, 以避免“局部箍缩”提前产生热斑辐射.

X 箍缩演化非常复杂, 在实验中, 即使对于 4.1

节中的匹配负载构型, 也观察到由于“二次箍缩”和“局部箍缩”产生多个热斑辐射的现象. 第 09089 发 ($32-25 \mu\text{m}\cdot\text{W}$) X 箍缩的波形及演化图像见图 9, 该发实验产生了四个高亮度的热斑辐射峰, 一直持续到电流峰值后 150 ns. 第一个峰 P_1 位于电流峰值附近且幅度最大, 此后还出现了三个纳秒脉冲 X 射线辐射峰 P_2-P_4 . P_1 和 P_2 之间间隔为 18 ns, P_3 与 P_2 , P_4 与 P_3 依次间隔 56 ns 和 58 ns. 图 9 (a) 电流波形上方还标识了图 9 (b) 的分幅图像拍摄时刻. 在 P_1 峰后, 交叉点区的等离子体快速膨胀并辐射大量的低能光子, 表明交叉点处仍积聚质量并在负载电流作用下继续演化. 在 K 层图像中则观察到了沿微 Z 箍缩轴线分布着多个热斑.

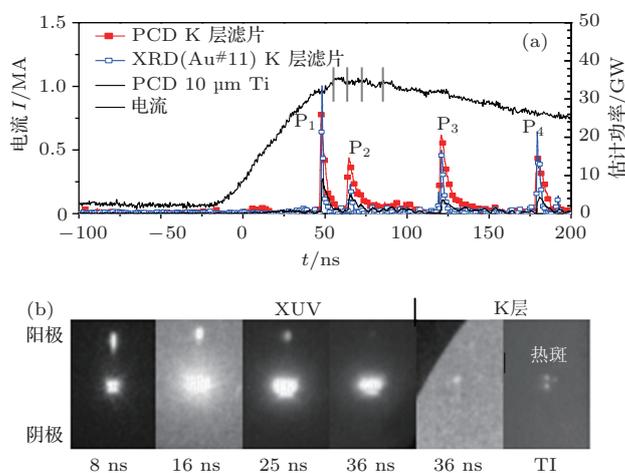


图9 第 9089 发 ($32-25 \mu\text{m}\cdot\text{W}$) X 箍缩波形 (a) 和软 X 射线分幅图像 (b), 分幅图像下方标识了图像快门时刻相对第一个 X 射线辐射时刻的时间间隔

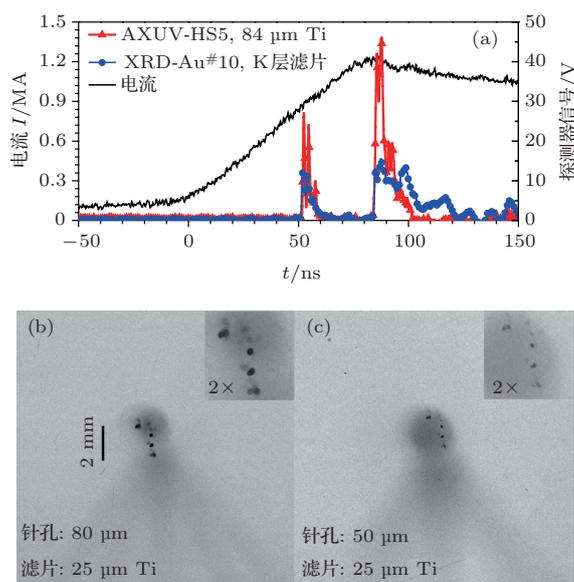


图 10 第 11042 发 ($32-25 \mu\text{m}\cdot\text{W}$) X 箍缩波形 (a) 及针孔图像 (b), (c)

第 11042 发 (32—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$) X 箍缩负载电流和 X 射线辐射波形见图 10, 该发实验产生了两组辐射峰. 第一组辐射位于电流峰值前 33 ns, 第二组辐射峰位于电流峰值处. 根据负载线质量与首个热斑辐射时刻的关系 (图 8), 第二组辐射峰是该负载的预期辐射, 而第一组辐射峰可能由于不均匀演化造成的“局部箍缩”, 提前出现热斑辐射. 针孔图像中观察到了五个较为明显的沿轴线处分布的热斑.

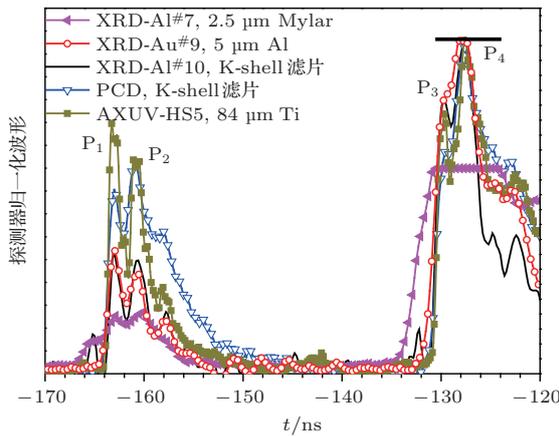


图 11 第 11042 发 (32—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$) X 箍缩不同探测器的归一化辐射波形

同一发实验中, 各辐射脉冲的能谱存在显著的差异. 第 11042 发 (32—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$) X 箍缩探测器的归一化波形见图 11, 不同的探测器滤片组响应不同能段的 X 射线, 从图中可以看出, 各峰处探测器

信号的相对强度差异很大, 表明 X 射线能谱存在显著差异, 对应着热斑等离子体的参数不同. 其中首个辐射峰 P_1 处的高能光子 (2.5—5 keV) 份额最大, 此后辐射峰中低能光子的份额逐渐增加, 这与图 5 (b) 的结果也是相符的.

4.4 X 箍缩多个热斑

X 箍缩脉冲 X 射线由其热斑等离子体产生, 多次脉冲 X 射线辐射对应着多个热斑等离子体. 实验中 X 箍缩热斑由时间积分的针孔相机记录, 尚不能得到热斑与脉冲 X 射线辐射波形的对应关系.

X 箍缩热斑主要分布于微 Z 箍缩电极处及电极之间, 根据空间分布情况, 可分为两种模式. 图 12 为第 09089 发 (32—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$ X 箍缩) 的针孔图像, 从图中可以看出, 热斑相对集中分布在微 Z 箍缩的阴阳极处, 且每一侧的热斑都有比较复杂的分布, 波形上也产生了多个 X 射线辐射. 这种模式中, 引起微 Z 箍缩不均匀演化的扰动尺度与微 Z 箍缩柱长度相当我们称其为长波长扰动, 很可能是由微 Z 箍缩的固有结构引起. 微二极管电极附近的轴向扩散和轴向洛伦兹力 $J_r B_\theta$, 引起其质量随着射流等离子体快速运输出去, 磁压压缩剩余质量, 形成直径较小的“颈部”区域, 并通过辐射坍塌进一步形成热斑.

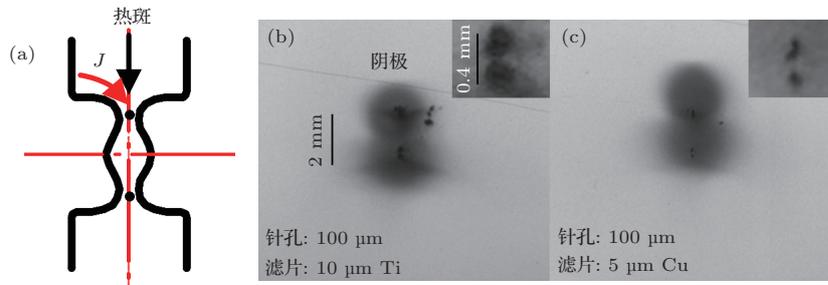


图 12 第 09089 发 (32—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$) X 箍缩针孔图像, 图中右上方为微二极管阳极的局部放大图

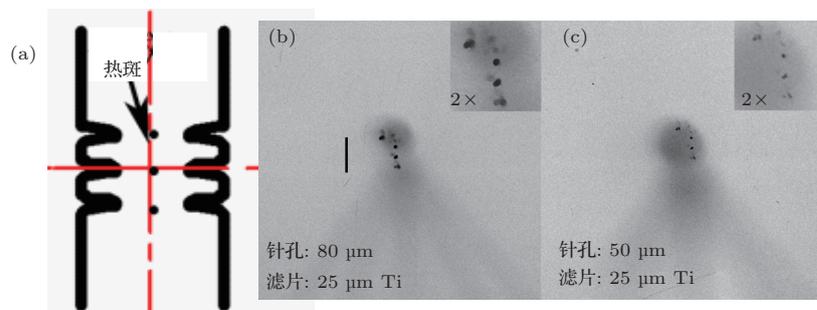


图 13 第 11037 发 (4—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$) X 箍缩针孔图像

如果扰动的特征尺寸小于微Z箍缩柱长度,沿着微Z箍缩柱方向(~ 2 mm)可以容纳多个初始扰动,每个扰动独立发展可以形成热斑,这种扰动称为短波长扰动模式(图 13(a)).第 11037 发(4—25 $\mu\text{m}\cdot\text{W}$ X 箍缩)的针孔图像如图 13 所示,该发次负载线质量为匹配负载的 1/8,其热斑分布于微Z箍缩轴线上及其电极处,热斑直径 < 50 μm ,空间间隔为 0.2—0.8 mm,辐射强弱存在差异.微Z箍缩电极处的热斑对应着上述长扰动模式,而轴线处的热斑由短波长扰动模式产生.

5 结果与讨论

本文总结了“强光一号”装置上兆安电流钨丝 X 箍缩实验特性.基于能量平衡方程,估算了 1 MA 电流热斑平衡半径为 1—10 μm 量级.通过实验,获得了“强光一号”装置的匹配 X 箍缩负载构型,得到了 X 箍缩多次脉冲 X 射线辐射及多个热斑分布的基本特性并给出其物理解释.

“强光一号”装置上匹配的 X 箍缩负载为 30 或 32 根 25 μm 钨丝 X 箍缩,线质量为 2.8—3.0 mg/cm,这种负载可一定概率产生单个脉冲 X 射线辐射,产生单个脉冲时, X 射线辐射时刻位于电流峰值附近, keV X 射线辐射功率为 ~ 35 GW、产额为 ~ 40 J、最小热斑尺寸 < 30 μm .

兆安电流 X 箍缩通常表现出多个脉冲 X 射线辐射.首个 keV 热斑辐射时间与负载线质量正相关,并受到负载丝直径的影响. X 箍缩通常产生多次脉冲 X 射线辐射,产生多次 X 射线脉冲的机理有局部箍缩和二次箍缩,多个脉冲 X 射线辐射对应着多个热斑.热斑是高亮度 X 射线的产生区域,由等离子体不稳定性引起初始扰动,由辐射坍塌机理形成.实验研究表明,热斑直径为 10 μm 量级,与基于能量平衡的物理分析基本一致.

在“强光一号”装置上,当匹配负载产生单一脉冲 X 射线辐射时, keV X 射线辐射产额为 10 J 量级,超过百千安电流 X 箍缩的辐射水平.然而脉冲放电等离子体负载参数随时间变化,通常还具有不稳定性的特征,实现稳定的脉冲放电等离子体射线源具有难度.特别是 X 箍缩热斑等离子体的空间尺度为微米量级、时间尺度为纳秒亚纳秒量级,实现其单一稳定性更加困难.在下一步的工作中,我们将基于本文对“强光一号”装置匹配负载以及多个辐射脉冲和热斑的认识,探索双层 X 箍缩等新的负

载构型,进一步研究引起多次辐射的物理机理,以期提高兆安电流 X 箍缩 X 射线点源的单一稳定性.

诚挚感谢“强光一号”加速器运行组在实验工作中的大力协助.

参考文献

- [1] Zakharov S M, Ivanenkov G V, Kolomenskii A A, Pikuz S A, Samokhin A I, Ulshmid I 1982 *Sov. Tech. Phys. Lett.* **8** 456
- [2] Wang X X 2012 *High Voltage Engineering* **18** 1359 (in Chinese) [王新新 2012 高电压技术 **38** 1537]
- [3] Shelkovenko T A, Sinars D B, Pikuz S A, Chandler K M, Hammer D A 2001 *Rev. Sci. Instrum.* **72** 667
- [4] Pikuz S A, Sinars D B, Shelkovenko T A, Chandler K M, Hammer D A, Ivanenkov G V, Stepniewski W, Skobelev I Yu 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 035003
- [5] Ye F, Zhang F Q, Yang J L, Li Z H, Guo C, Xu Z P, Xu R K, Xia G X, Ning J M, Song F J, Chen J C, Zhong Y H, Jin Y J 2006 *High Power Laser Part. Beams* **18** 1359 (in Chinese) [叶凡, 章法强, 杨建伦, 李正宏, 郭存, 许泽平, 徐荣昆, 夏广新, 宁家敏, 宋凤军, 陈进川, 钟耀华, 金永杰 2006 强激光与粒子束 **18** 1359]
- [6] Zhou S T, Li J, Huang X B, Cai H C, Zhang S Q, Li J, Duan S C, Zhou R G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 165202 (in Chinese) [周少彤, 李军, 黄显宾, 蔡红春, 张思群, 李品, 段书超, 周荣国 2012 物理学报 **61** 165202]
- [7] Zhao T, Zou X B, Zhang R, Wang X X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075205
- [8] Mesyats G A, Shelkovenko T A, Ivanenkov G V, Agafonov A V, Savinov S Yu, Pikuz S A, Tilikin I N, Tkachenko S I, Chaikovskii S A, Ratakhin N A, Fedushchak V F, Oreshkin V I, Fedyunin A V, Russkikh A G, Labetskaya N A, Artemov A P, Hammer D A, Sinars D B 2010 *J. Exp. Theor. Phys.* **111** 363
- [9] Ruggles L E, Porter J L, Rambo P K, Simpson W W, Vargas M F, Bennett G R, Smith I C 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 2206
- [10] Kantsyrev V L, Fedin D A, Shlyaptseva A S, Hansen S, Chamberlain D, Ouart N 2003 *Phys. Plasmas* **10** 2519
- [11] Sinars D B, Pikuz S A, Douglass J D, McBride R D, Ampledord D J, Knapp R, Bell K, Chalenksi D, Cuneo M E, Greenly J B, Hammer D A, Kusse B R, Mingaleev A, Shelkovenko T A, Wenger D F 2008 *Phys. Plasmas* **15** 092703
- [12] Anan'ev S S, Bakshaev Yu L, Blinov P I, Bryzgunov V A, Dan'ko S A, Zelenin A A, Kazakov E D, Kalinin Yu G, Kingsep A S, Korolev V D, Mizhiritskiy V I, Pikuz S A, Smirnov V P, Sokolov M M, Tkachenko S I, Ustrov G I, Chernenko A S, Shelkovenko T A 2009 *Plasma Phys. Rep.* **35** 459
- [13] Sinars D B, McBride R D, Pikuz S A, Shelkovenko T A, Wenger D F, Cuneo M E, Yu E P, Chittenden J P,

- Harding E C, Hansen S B, Peyton B P, Ampleford D J, Jennings C A 2012 *Phys. Rev. Lett.* **109** 155002
- [14] Chittenden J P, Lebedev S V, Jennings C A, Bland S N, Ciardi A 2004 *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** B457
- [15] Chung H K, Chen M H, Morgan W L, Ralchenko Y, Lee R W 2005 *High Energ. Dens. Phys.* **1** 3
- [16] Chittenden J P, Lebedev S V, Jennings C A, Bland S N, Ciardi A 2004 *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** B457–B476
- [17] 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]
- [18] Guo N 2009 *MS Thesis* (Beijing: North China Electric Power University) (in Chinese) [郭宁 2009 硕士学位论文 (北京: 华北电力大学)]
- [19] Wu G, Wu J, Qiu A C, Wang L P, Lv M, Qiu M T, Cong P T, Zhen L, Cui M Q, Zhao Y D 2010 *High Power Laser Part. Beams* **22** 1285 (in Chinese) [吴刚, 吴坚, 邱爱慈, 王亮平, 吕敏, 邱孟通, 丛培天, 郑雷, 崔明启, 赵屹东 2010 强激光与粒子束 **22** 1285]
- [20] Qiu M T, Lv M, Wang K L, Hei D W, Qiu A C, Zeng Z Z, Du J Y, Kuai B, Yuan Y, Tian H, Sun F R, Luo J H 2003 *High Power Laser Part. Beams* **15** 101 (in Chinese) [邱孟通, 吕敏, 王奎禄, 黑东炜, 邱爱慈, 曾正中, 杜继业, 蒯斌, 袁媛, 田慧, 孙凤荣, 罗建辉 2003 强激光与粒子束 **15** 101]
- [21] Haines M G 2011 *Plasma Phys. Control. Fusion* **53** 093001

Experimental investigations of tungsten X-pinches using the QiangGuang-1 facility*

Wu Jian^{1)2)†} Wang Liang-Ping²⁾ Li Mo²⁾ Wu Gang²⁾ Qiu Meng-Tong²⁾
Yang Hai-Liang²⁾ Li Xing-Wen¹⁾ Qiu Ai-Ci¹⁾²⁾

1) (State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

2) (State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 30 May 2013; revised manuscript received 14 October 2013)

Abstract

In order to obtain a single brighter point X-ray source, tungsten X-pinch experiments were carried out on the QiangGuang-1 facility. The equilibrium radius of the bright spots was estimated based on the energy balance equation. X-pinch load test covered wire diameters from 25 to 100 μm , wire number from 2 to 48, and the load linear mass from 0.18 to 6.9 mg/cm. The load peak current was 1.0–1.4 MA and the rise time for 10%–90% was 60–70 ns. From the experiments, the matched load for “QiangGuang-1” facility was the 30 or 32 wire-25 μm X pinch with the load linear mass of 2.8–3.0 mg/cm, which can produce a single nanosecond X-ray pulse around current peak with a certain probability. A typical keV X-ray radiation had a pulse width of 1 ns, the radiation power from the bright spot being 35 GW, the radiation yield being 40 J, and the spot size being about 30 μm . Multiple bright spots and multiple X-ray bursts at the crossing were usually observed in the experiments. Multiple X-ray bursts were probably caused by secondary pinches or partial pinches, and multiple bright spots were caused by long wavelength perturbations or localized short wavelength perturbations along the “min Z-pinch” axis. Compared with hundreds of kilo-ampere devices, mega-ampere facilities produced greater X-ray radiation, but further improvements are needed to produce a single X-ray burst steadily.

Keywords: X-pinch, bright spot, megaampere

PACS: 52.59.Qy, 52.80.Qj

DOI: 10.7498/aps.63.035205

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51237006).

† Corresponding author. E-mail: jxjawj@gmail.com