

Al 丝物理状态调控及对芯晕演化特性的影响

张金海^{1,2}, 李沫¹, 孙铁平¹, 王亮平¹, 李阳¹, 吴撼宇¹, 丛培天¹, 盛亮¹, 邱爱慈¹

(1. 西北核技术研究所 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室, 陕西 西安 710024;

2. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

摘要: 基于快直线脉冲变压器(FLTD)平台开展了数十 kA 电流下 Al 单丝芯晕演化特性研究, 实验发现丝过早发生电压击穿会减少丝芯的能量沉积, 而晕等离子体的迅速发展将约束丝芯的进一步膨胀, 降低丝芯膨胀速度。通过调整负载两端的初始电压、丝长及增加闪络开关等手段, 抑制了 Al 丝的过早击穿, 增加了早期能量沉积, 获得了不同的丝芯物理状态(部分气化或完全气化)。Al 丝的气化提高了丝芯膨胀速度, 最高达 11~14 km/s, 晕等离子体发展缓慢, 延缓了边界处不稳定性的出现, 降低了后期 $m=0$ 的发展速度。FLTD 负极性输出时, Al 丝沿轴向的极性效应更加明显, 靠近阴极处丝芯膨胀慢, 边界处晕等离子体密度高, 不稳定性的发展速度快。

关键词: 快直线脉冲变压器; 芯晕; 击穿; 气化

中图分类号: TL65 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2019)12-2336-08

doi: 10. 7538/yzk. 2019. youxian. 0071

Regulation of Physical State of Aluminum Wire and Effect on Evolution of Core-corona Structure

ZHANG Jinhai^{1,2}, LI Mo¹, SUN Tieping¹, WANG Liangping¹, LI Yang¹,
WU Hanyu¹, CONG Peitian¹, SHENG Liang¹, QIU Aici¹

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

2. Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The core-corona evolution of single aluminum wire was studied based on fast linear transformer driver (FLTD) with dozens of kilo-ampere current. It is found that premature breakdown of the wire can reduce the deposited energy. The rapid development of the coronal plasma can restrain further expansion of the wire core and weaken the expansion rate. By adjusting the initial voltage across the load and wire length, and inserting the flashover switch at high voltage electrode, the premature breakdown was suppressed and different physical states of wire core (partially vaporized or completely vaporized) were obtained with substantial improvement of the deposited energy. The

收稿日期: 2019-02-19; 修回日期: 2019-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51790524); 强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基金资助项目(SKLIPR15037, SKLIPR1701)

作者简介: 张金海(1989—), 男, 河北衡水人, 博士研究生, 从事脉冲功率技术与等离子体参数诊断研究

网络出版时间: 2019-07-23; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190723.1034.002.html>

vaporization of aluminum atoms obviously increases the expansion rate of wire core (up to 11-14 km/s) and the coronal plasma develops slowly after the ionization of vaporized atoms at the boundary, which delays the occurrence of instability and decreases the development of $m=0$ instability at later stage. The polarity effect of aluminum wire core along the axis is more obvious with the negative output of FLTD. The expansion rate of wire core is slower near the cathode with a higher coronal plasma density at the boundary and the development of instability is faster.

Key words: fast linear transformer driver; core-corona; breakdown; vaporization

在 MA 级丝阵 Z 箍缩中,金属丝表面很早即发生电压击穿,丝表现为冷启动,呈典型芯晕结构。丝阵在全局磁场作用下向内消融,消融等离子体沿轴线呈准周期调制分布,调制波长与丝材料密切相关。文献[1-4]根据 MAGPIE 装置上的不同材料金属丝阵消融过程的图像,获得 Al 和 W 的调制波长分别约为 0.5 mm 和 0.25 mm。文献[5-6]在 1 MA-ZEBRA 装置上研究了预脉冲调制对丝阵早期演化过程的影响,实验发现早期不同状态直接影响丝阵后续的内爆动力学和 X 射线辐射产额,一定范围内预脉冲电流上升速率越快,辐射产额越高。而在 MAGPIE 装置上开展的预脉冲(15 kA 或 35 kA,约 500 ns)条件下的 Al 丝阵实验,辐射功率和产额缩小约 30 倍,原因是长时间预脉冲加速了磁瑞利-泰勒不稳定性的发展[7]。

为了改变丝芯物理状态,国内外开展了一系列 1~5 kA 的小电流装置上单丝实验。Sarkisov^[8-9]在正极性快脉冲(150 A/ns)条件下实现了 Al 丝和镀膜 W 丝的几乎完全气化,大幅提高了丝芯的能量沉积;Wu 等^[10-11]在负极性快脉冲条件下实现了 Al 丝和镀膜 W 丝的几乎完全气化;Shi 等^[12]在负极性快脉冲条件下,通过增加绝缘闪络开关改变径向电场分布,实现了裸 W 丝的几乎完全气化。但考虑到丝阵早期消融呈现一定的单丝行为,上述研究中实验电流较小,气化丝芯电离较少,因而未能给出丝芯物理状态改变对芯晕演化特性尤其是晕等离子体不稳定性出现和发展的影响。基于快直线脉冲变压器(FLTD),本文考虑在数十 kA 电流下实现 Al 单丝早期物理状态的调控,并获得其对后续芯晕演化特性的影响。

1 实验布局

FLTD 平台包含 12 个支路,每个支路由两

个电容器和 1 个气体开关组成,充电电压 25~100 kV 可调,不同电压下电流上升时间(约 100 ns)相当,峰值电流随充电电压的增大而增大;输出正负极性可调,充电电压较低时,正负极性均正常工作,提高充电电压,负极性工作时存在电流损失,而正极性工作正常。图 1 为用于 Z 箍缩实验的 FLTD 平台示意图,实验在真空条件下进行,分子泵出口处的真空低于 10^{-3} Pa 时进行实验。图 2a 为负载区的结构示意图,采用罗氏线圈测量通过负载的电流,采用同轴型水电阻分压器测量负载电压,图 2b 为电容器充电 ± 30 kV 时正负极性输出的电压电流波形,负载端的电压与电容器充电电压相当。实验用 Al 丝的直径为 15 μm ,长度分别为 2 cm 和 0.75 cm。

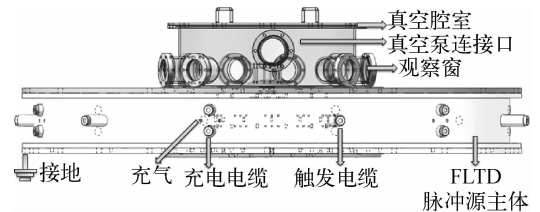


图 1 FLTD 平台示意图

Fig. 1 Schematic diagram of FLTD

图 3 为 FLTD 平台等离子体光学诊断系统布局。光路设计为两路阴影图像,一路干涉图像,激光波长 532 nm。两幅阴影图像通过延长光路设计延时,时间间隔约 15 ns 或 8 ns,两条光路呈 30° ;干涉光路则基于 Mach-Zehnder 光路,成像系统均采用双透镜 $4f$ 成像方式,采用 Canon 相机记录图像。选用光电探测器 THORLABS-DET10A-M 记录激光出光时刻,与电流信号关联用于确定和调整拍照时刻。

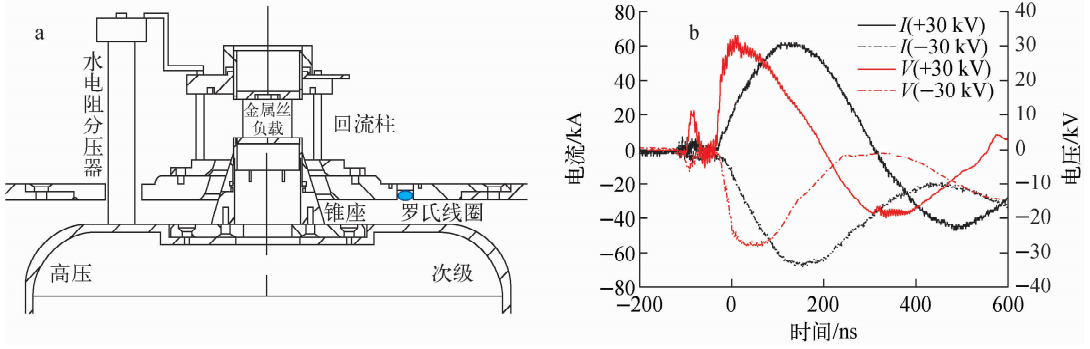


图2 基于FLTD平台的Z箍缩负载(a)和不同极性输出的电流、电压波形(b)

Fig. 2 Z-pinch load based on FLTD (a) and current and voltage in different polarities (b)

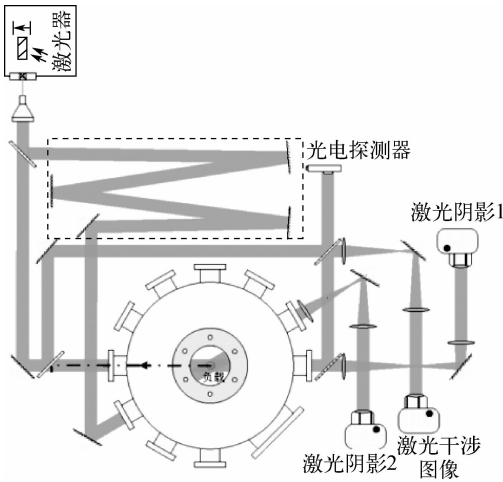


图3 FLTD平台等离子体光学诊断系统布局

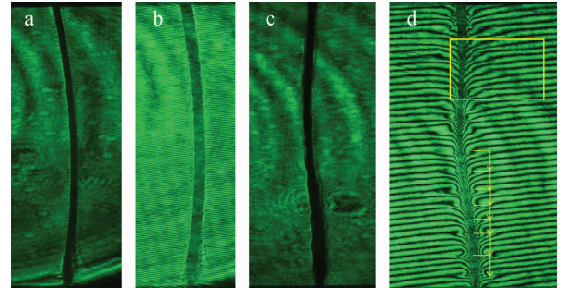
Fig. 3 Layout of plasma optical diagnostic system on FLTD

2 实验结果与分析

2.1 Al丝早期物理状态的调控

图4为FLTD平台分别充电 ± 60 kV和 ± 30 kV时Al单丝激光探针图像(横纵比为2),

其中Al丝直径 $15\ \mu\text{m}$ 、丝长2 cm。两种电压下,Al丝均呈典型芯晕结构, ± 60 kV充电时,电流大且电流上升率快,丝芯膨胀速度更快。15 ns时刻丝芯平均直径为 $220\ \mu\text{m}$,对应电流为13 kA(图4a);95 ns时刻丝芯平均直径为 $230\ \mu\text{m}$,对应电流为40 kA(图4c)。图5为



a—— ± 60 kV, 15 ns 阴影;b—— ± 60 kV, 15 ns 干涉;
c—— ± 30 kV, 95 ns 阴影;d—— ± 30 kV, 95 ns 干涉

图4 FLTD平台分别充电 ± 60 kV和 ± 30 kV时Al单丝激光探针图像

Fig. 4 Laser probe image of single aluminum wire with FLTD charging ± 60 kV and ± 30 kV

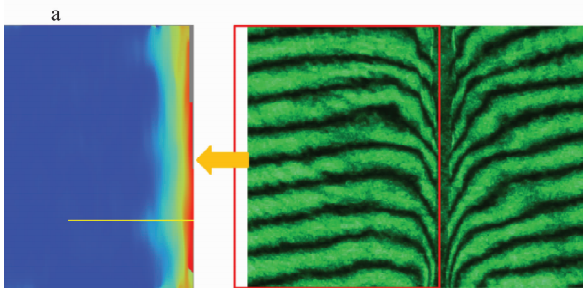


图5 图4d中黄框标记处的干涉条纹反演(a)及标记位置电子面密度分布(b)

Fig. 5 Inversion of laser interference in Fig. 4d (a) and area electron density distribution at sign position (b)

图 4d 黄框处干涉条纹的反演图像和电子面密度分布^[13],峰值电子面密度为 $7.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$,对图 5b 中的电子面密度沿径向积分得到电子线密度约为 $6.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$ (两侧),采用文献^[14]中给出的 Al 原子电离度 4~5,则已电离的 Al 原子数为 $(1.2 \sim 1.5) \times 10^{16} \text{ cm}^{-1}$,约为初始质量的 10%~15% (直径 15 μm Al 丝的原子线密度为 $1.06 \times 10^{17} \text{ cm}^{-1}$),尚有大部分质量仍处于原子状态。

为提高 Al 丝单位长度上的能量沉积,FLTD 平台仍充电 $\pm 30 \text{ kV}$,实验中减小丝的长度(0.75 cm),其他条件保持不变。图 6 为 FLTD 充电 $\pm 30 \text{ kV}$ 时 0.75 cm Al 丝不同时刻激光探针图像,丝芯膨胀速度明显快于图 4 中 2 cm 负载的情况,达到部分气化,丝芯可分

成致密原子区和气化原子区。5 ns 时刻两个区域的直径分别为 0.41 mm 和 0.58 mm,气化部分发生少量电离,密度较低,丝芯仍处于欧姆加热阶段。随电流的增大,气化原子逐渐电离,等离子体的出现和迅速膨胀降低了回路阻抗,电流转移至边界等离子体部分,从而约束了丝芯的进一步膨胀。43 ns 时刻(约 25 kA)致密原子区和气化原子区的直径分别为 0.54 mm 和 0.94 mm。图 7 为 43 ns 时刻激光干涉条纹反演及条纹移动量分布,可判断对应时刻丝芯呈现为等离子体-气化原子-致密原子多维结构,各部分间具有明显的界限。

为了使丝芯接近完全气化,在电极处嵌入绝缘子(图 8),保证输出电极与负载电极间有一定的绝缘长度,以延迟丝表面发生电压击穿

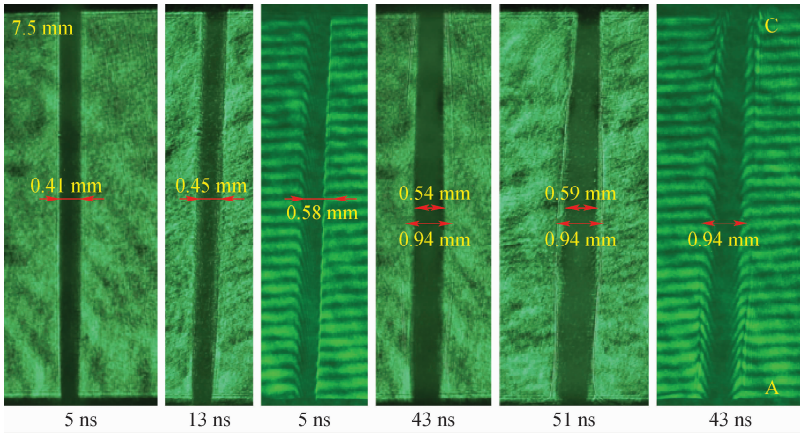


图 6 FLTD 充电 $\pm 30 \text{ kV}$ 时 0.75 cm Al 丝不同时刻激光探针图像

Fig. 6 Laser probe image of 0.75 cm aluminum wire at different time with FLTD charging $\pm 30 \text{ kV}$

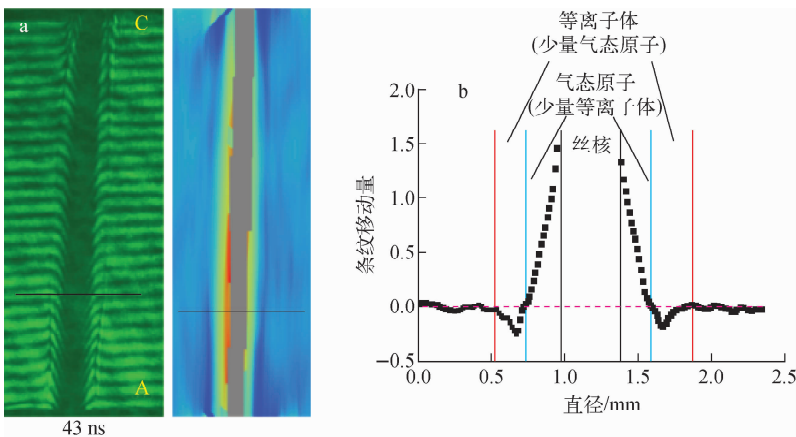


图 7 43 ns 时刻的激光干涉条纹反演(a)及标记位置条纹移动量分布(b)

Fig. 7 Inversion of laser interference fringe at 43 ns (a) and fringe shift distribution at sign position (b)

的时刻,实验中 FLTD 充电电压 ± 30 kV 和负载长度 0.75 cm 保持不变。图 9a 为电极增加闪络开关后 Al 丝演化的激光探针图像。15 ns 时刻 Al 丝基本实现了完全气化,激光能完全透过丝芯,丝芯直径为 0.76 mm;23 ns 时刻丝芯直径膨胀至 0.94 mm(同发次),丝芯膨胀速度达 11 km/s,较 1~5 kA 电流下的 Al 丝膨胀速度还要快^[8,14],原因是由于本实验中 FLTD 提供的电流上升率(600~700 A/ns)更高所致。根据文献[15]中计算原子分布的方法,得到图 9a 中干涉条纹的反演图像和原子面密度分

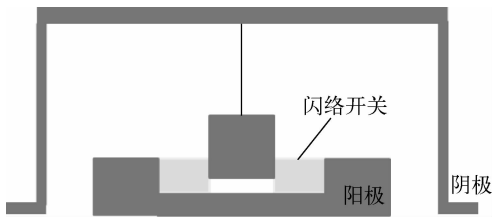


图 8 电极输出端增加闪络开关结构示意图
Fig. 8 Schematic diagram of flashover switch inset at output electrode

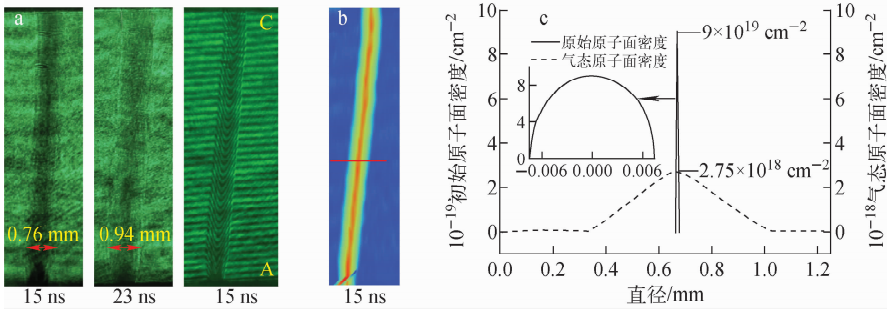


图 9 电极增加闪络开关后 Al 丝的激光探针图像(a)、干涉条纹反演(b)和标记位置原子面密度分布(c)
Fig. 9 Laser probe image of aluminum (a), inversion of laser interference (b) and area electron density distribution at sign position (c) after inseting flashover switch at electrode

布(图 9b,c),15 ns 时刻对应的峰值原子面密度约为 $2.75 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ (初始原子面密度约为 $9 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$),原子线密度约为 $1.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-1}$,初始 Al 原子数超过 90%以上,说明 Al 丝接近完全气化。

2.2 不同丝芯物理状态对 Al 丝芯晕演化特性的影响

图 10a 为 FLTD 平台充电 ± 60 kV 时不同时刻 Al 丝激光阴影图像,丝长 2 cm。早期丝芯沿轴向均匀膨胀,不同时刻的丝芯直径如图 10b 所示,膨胀速度($v_{\text{core}} \approx 3.3 \text{ km/s}$)在一段时间内保持不变。而 Al 丝很早即发生电压击穿,图 11 为 2 cm Al 丝晕等离子体不稳定性的出现和发展,图 11a 为 15 ns 时刻激光探针图像的局部放大,此时 Al 丝表面已发生电离,丝芯周围形成典型的低密度晕等离子体,且沿轴向具有明显的不均匀性,具体表现为长波和短波两种形式。随丝芯边界处等离子体密度的升高和晕等离子体的膨胀,该部分阻抗迅速降低,电流全部转移到外侧,自磁箍缩则约束了丝芯

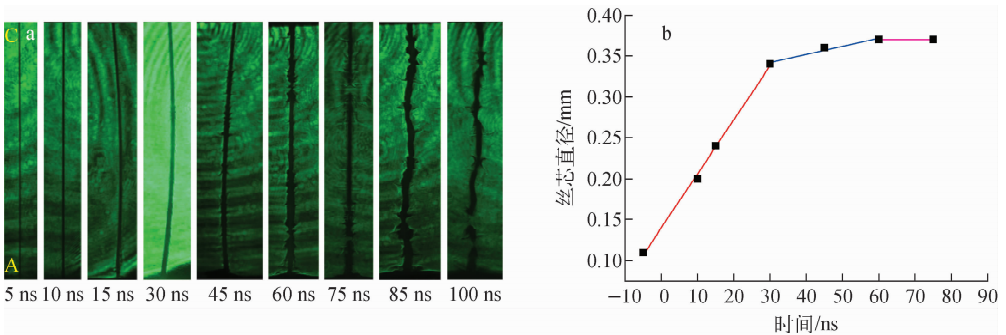


图 10 FLTD 充电 ± 60 kV 时 2 cm Al 丝的演化过程(a)和丝芯膨胀曲线(b)

Fig. 10 Evolution of 2 cm aluminum wire with FLTD charging ± 60 kV (a) and curve of wire core expansion (b)

的进一步膨胀,最大丝芯直径约为 0.37 mm; 晕等离子体的不稳定性在自磁箍缩作用下迅速发展,后期主要表现为长波模式的腊肠不稳定性($m=0$),晕等离子体轴向平均调制周期约为 1.3 mm,不稳定性的持续发展最终导致丝芯断裂。而 FLTD 充电 ± 30 kV 时,Al 单丝晕等离子体沿轴向同样表现为典型的调制分布,平均调制周期仍约为 1.3 mm,区别是电流小、自磁箍缩作用弱、 $m=0$ 不稳定性的发展速度减慢。

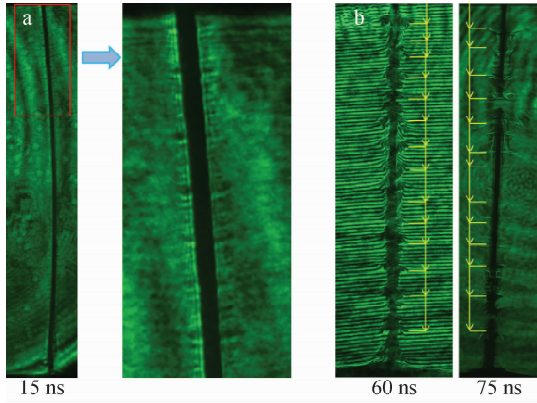


图 11 2 cm Al 丝晕等离子体不稳定性的出现(a)和发展(b)

Fig. 11 Appearance (a) and development (b) of corona plasma instability of 2 cm aluminum wire

对于完全气化的 Al 丝负载(± 30 kV 充电、0.75 cm 丝长、增加闪络开关),随电流的增大,气化 Al 原子逐渐电离,丝芯呈等离子体和气化 Al 原子二元分布,二者具有明显的分界线(图 12),35 ns 时刻(约 23 kA)的干涉条纹在等离子体和气化原子分界处出现明显的反转

(图 13),对应时刻等离子体区域沿轴向较为均匀,尚未出现明显的不稳定性,回路阻抗降低,几乎全部电流通过等离子体,而电流的自箍缩效应约束了气化丝芯的进一步膨胀。随气化 Al 原子的电离,等离子体密度迅速升高,图 13a 中 67 ns 时刻(约 38 kA)干涉条纹在边界处迅速截止,说明对应位置具有较高的密度梯度,阴影区域直径沿轴向自阴极向阳极逐渐增大,呈现一定的极性效应,即越靠近阴极气化丝芯电离速度越快,分析原因是,阴极发射的初始电子在电磁场综合作用下与气化原子碰撞发生电离并产生二次电子,二次电子导致气化边界接续电离(图 13b)。晕等离子体在边界处出现扰动且沿轴向呈准周期调制分布,调制的波长为 550~600 μm (图 12 中 67 ns 和 75 ns 激光阴影图像),受极性效应的影响,靠近阴极丝芯膨胀慢的位置不稳定性出现时间早,发展速度快。晕等离子体沿轴向的扰动在自磁箍缩作用下持续发展($m=0$ 不稳定性),图 12 中 107 ns 和 115 ns 时刻为同一发次的分幅图像,丝芯已断裂,沿轴向呈典型的块状分布。

2.3 极性改变对 Al 丝芯晕演化特性的影响

大型脉冲功率装置通常为负极性输出,因而需研究负极性条件对 Al 丝芯晕演化的影响。借鉴前述气化 Al 丝芯的方法,FLTD 负极性输出时仍在电极处增加闪络开关以延迟 Al 丝的击穿时刻,提高丝芯能量沉积。图 14a 为充电 ± 30 kV 负极性输出时 0.75 cm Al 丝的激光探针图像,与正极性输出时的结果相似,Al 丝芯几乎完全气化,15~23 ns 时刻,标记位置的丝芯直径从 0.73 mm 膨胀至 0.96 mm,丝

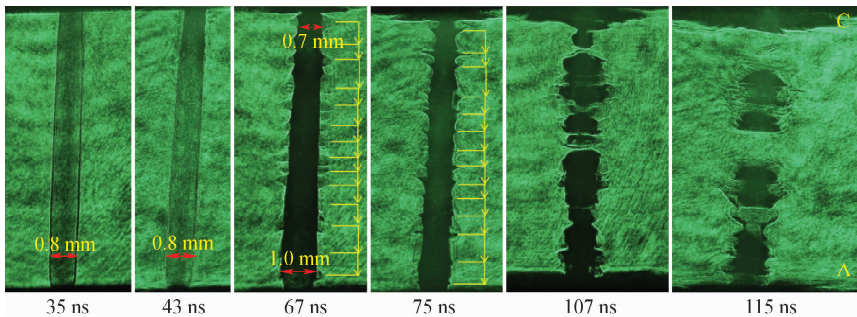


图 12 FLTD 充电 ± 30 kV 时电极增加闪络开关后 0.75 cm Al 丝不同时刻激光阴影图像

Fig. 12 Laser shadow-image of 0.75 cm aluminum wire after insetting flashover switch with FLTD charging ± 30 kV

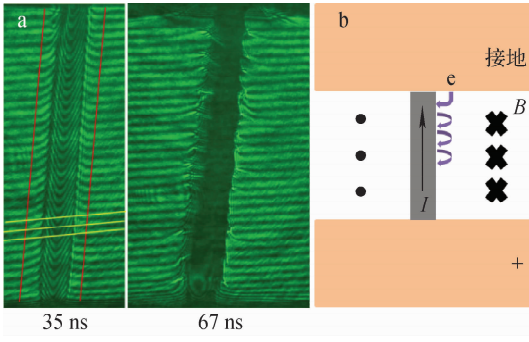


图 13 气化 Al 丝芯晕演化的干涉图像(a)和极性效应机制分析(b)

Fig. 13 Laser interference image of vaporized aluminum wire core-corona evolution (a) and analysis of polarity effect (b)

芯膨胀速度达 14.4 km/s。图 14b、c 分别为 15 ns 时刻激光条纹的反演和标记位置的原子面密度分布,可知气化丝芯的峰值原子面密度为 $3.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$,积分得到原子线密度约为 $1.06 \times 10^{17} \text{ cm}^{-1}$ 。丝芯沿轴向较正极性时呈更明显的极性效应,阴极附近丝芯的电离速度快,靠近阴极处晕等离子体密度高,43 ns 时刻的干涉图靠近阴极处的条纹很快截止,说明边界处密度梯度大,沿轴向自阴极向阳极晕等离

子体数量和密度梯度逐渐减小。分析原因为:极性改变后阴极作为高压极更易发射电子,因而靠近阴极处的 Al 丝芯更早发生电离,等离子体密度的急剧升高限制了该部分丝芯的进一步膨胀。与电离速度对应,阴极附近晕等离子体不稳定性出现时间早且发展速度快(图 14a 中 51 ns 时刻)。

综上,不同早期物理状态决定了芯晕演化特性,根据式(1)角向磁场与电流的关系,当流过丝的电流 I_z 相同时,丝芯直径 a 越小,角向磁场强、电流导致的自磁箍缩效应越强,图 11 中 Al 丝呈典型芯晕结构时($a=0.37 \text{ mm}$),晕等离子体不稳定性的发展速度明显快于图 12 和图 14 中 Al 丝芯完全气化的情况($a=1 \text{ mm}$)。而对于图 12 和图 14 中的气化丝芯,极性效应导致靠近阴极端丝芯边界处的电流密度高,因而对丝芯约束力强,阴极附近晕等离子体早期扰动出现时刻早,后期 $m=0$ 不稳定性发展速度快。

$$B_{\theta} = \frac{\mu_0 I_z}{2\pi a} \quad (1)$$

其中: B_{θ} 为丝周围的角向磁场; μ_0 为真空磁导率; I_z 为通过金属丝的电流; a 为丝芯直径。

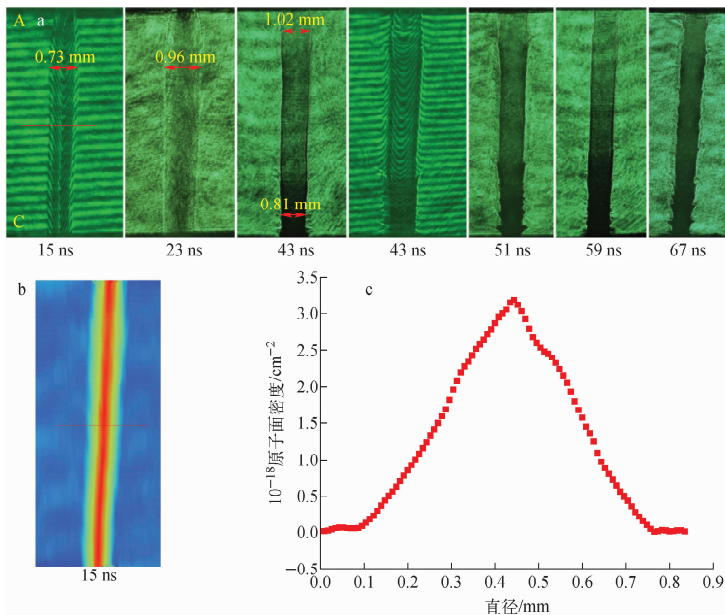


图 14 负性条件下电极增加闪络开关后 0.75 cm Al 丝的芯晕演化过程(a)、干涉条纹反演(b)和标记位置原子面密度分布(c)

Fig. 14 Core-corona evolution of 0.75 cm aluminum wire (a), inversion of laser interference (b) and area electron density distribution at sign position (c) after inseting flashover switch at negative output of FLTD

3 结论

基于 FLTD 平台系统研究了 Al 单丝芯晕演化特性,通过调整充电电压、丝长和增加绝缘闪络开关等方法,获得了不同的 Al 丝物理状态。Al 丝呈典型芯晕演化时,晕等离子体出现时间早、膨胀速度快,回路阻抗迅速降低,导致电流几乎全部转移到等离子体区域,而电流增大引起的自磁箍缩效应限制了丝芯的进一步膨胀;早期晕等离子体兼具有短波和长波不稳定性特性,初始的长波扰动即为后期 $m=0$ 不稳定性的主导因素,不稳定性的持续发展最终导致丝芯断裂。Al 丝部分气化或完全气化时,丝芯膨胀速度明显变快,完全气化时丝芯膨胀速度达 $11\sim 14\text{ km/s}$;丝芯由固态到气化再到初始电离的过程中丝芯边界均较为平滑,晕等离子体沿轴向较为均匀,未发现早期的短波不稳定性;而随晕等离子体密度的升高和驱动电流的增大,等离子体在边界处开始出现扰动,该扰动在自磁箍缩作用下迅速发展为宏观的腊肠不稳定性($m=0$ 模式)。对于 MA 级装置上的丝阵实验,可采用上述技术手段在预脉冲及主电流开始阶段实现丝芯物理状态调控,改变初始质量分布,通过合理选择丝阵直径和丝数,有望在内爆前形成准壳层质量分布,进而研究其对丝阵内爆动力学过程及辐射特性的影响。

参考文献:

- [1] LEBEDEV S V. The dynamics of wire array Z-pinch implosions[J]. *Physics of Plasmas*, 1999, 6(5): 2 016-2 022.
- [2] CHITTENDEN J P. One-, two-, and three-dimensional modeling of the different phases of wire array Z-pinch evolution[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(5): 2 305-2 314.
- [3] LEBEDEV S V. Effect of discrete wires on the implosion dynamics of wire array Z pinches[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(8): 3 734-3 747.
- [4] HAINES M G. A review of the dense Z-pinch [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2011, 53(9): 093001.
- [5] SARKISOV G S. Effect of current pre-pulse on wire array initiation on the 1-MA ZEBRA accelerator[J]. *Physics of Plasmas*, 2007, 14(5): 052704.
- [6] SARKISOV G S. Initiation of aluminum wire array on the 1-MA ZEBRA accelerator and its effect on ablation dynamics and X-ray yield[J]. *Physics of Plasmas*, 2007, 14(11): 112701.
- [7] BEG F N, LEBEDEV S V, BLAND S N, et al. The effect of current prepulse on wire array Z-pinch implosions[J]. *Physics of Plasmas*, 2002, 9(1): 375-377.
- [8] SARKISOV G S. Nanosecond electrical explosion of thin aluminum wires in a vacuum; Experimental and computational investigations[J]. *Physical Review E*, 2005, 71(4): 046064.
- [9] SARKISOV G S. Corona-free electrical explosion of polyimide-coated tungsten wire in vacuum[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(3): 035004.
- [10] WU Jian, LI Xingwen, WANG Kun, et al. Transforming dielectric coated tungsten and platinum wires to gaseous state using negative nanosecond-pulsed-current in vacuum[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(11): 112708.
- [11] WU Jian, LI Xingwen, LI Mo, et al. Review of effects of dielectric coatings on electrical exploding wires and Z pinches[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(40): 403002.
- [12] SHI Huantong, ZOU Xiaobing, WANG Xinxin. Fully vaporized electrical explosion of bare tungsten wire in vacuum[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(13): 134105.
- [13] 刘振,邹晓兵,王新新,等. 用马赫-贞德干涉仪测量喷气式 Z 箍缩等离子体密度[J]. *强激光与粒子束*, 2004, 16(1): 129-132.
- LIU Zhen, ZOU Xiaobing, WANG Xinxin, et al. Measuring the electron density of plasma in Z-pinch with a Mach-Zehnder interferometer[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16(1): 129-132(in Chinese).
- [14] HARVEY-THOMPSON A J, LEBEDEV S V, PATANKAR S, et al. Optical Thomson scattering measurements of cylindrical wire array parameters[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19(5): 056303.
- [15] 吴坚,李兴文,李阳,等. 快前沿电流产生气化 Al 单丝 Z 箍缩负载的研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(12): 125206.
- WU Jian, LI Xinxin, LI Yang, et al. Gasified single wire aluminum Z-pinch load formed by fast rising current[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(12): 125206(in Chinese).