

表面绝缘混合平面丝阵 Z 箍缩激光阴影图像诊断

盛亮 彭博栋 袁媛 张美 李奎念 张信军 赵晨 赵吉祯 李沫 王培伟 李阳

Laser shadowgraphy diagnostics for insulated-ordinary mixed planar wire array Z pinches

Sheng Liang Peng Bo-Dong Yuan Yuan Zhang Mei Li Kui-Nian Zhang Xin-Jun Zhao Chen
Zhao Ji-Zhen Li Mo Wang Pei-Wei Li Yang

引用信息 Citation: Acta Physica Sinica 63, 235205 (2014) DOI: 10.7498/aps.63.235205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.235205>

当期内容 View Table of Contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/volumn/home.shtml>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[双绞铝丝纳秒电爆炸实验研究](#)

盛亮, 李阳, 吴坚, 袁媛, 赵吉祯, 张美, 彭博栋, 黑东炜
2014, 63(20): 205206. 全文: [PDF](#) (0KB)

[基于等离子体粒子模拟的喷气 Z 箍缩过程物理研究](#)

丰志兴, 宁成, 薛创, 李百文
2014, 63(18): 185203. 全文: [PDF](#) (1177KB)

[脉冲功率驱动器与 Z 箍缩负载耦合的全电路数值模拟](#)

薛创, 丁宁, 孙顺凯, 肖德龙, 张扬, 黄俊, 宁成, 束小建
2014, 63(12): 125207. 全文: [PDF](#) (656KB)

[Z 箍缩 Al 等离子体 X 特征辐射谱线数值模拟及考虑叠加效应后的修正](#)

高启, 张传飞, 周林, 李正宏, 吴泽清, 雷雨, 章春来, 祖小涛
2014, 63(12): 125202. 全文: [PDF](#) (454KB)

[表面绝缘铝平面丝阵 Z 箍缩实验研究](#)

盛亮, 李阳, 袁媛, 彭博栋, 李沫, 张美, 赵吉祯, 魏福利, 王亮平, 黑东炜, 邱爱慈
2014, 63(5): 055201. 全文: [PDF](#) (6615KB)

表面绝缘混合平面丝阵Z箍缩激光阴影图像诊断*

盛亮[†] 彭博栋 袁媛 张美 李奎念 张信军 赵晨 赵吉祯 李沫
王培伟 李阳

(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, 西安 710024)

(2014年5月23日收到; 2014年7月15日收到修改稿)

基于脉冲半高全宽约为9 ns、波长为532 nm的Nd:YAG激光器, 采用条纹相机和商用数码相机两种记录设备, 建立了时间分辨和时间积分两种模式的激光阴影图像诊断系统, 在“强光一号”装置上对表面绝缘混合平面丝阵Z箍缩等离子体开展了实验研究. 实验结果表明: 在融蚀过程中表面绝缘金属丝冕等离子体发展较普通金属丝慢, 在 $t = 44$ ns到 $t = 56$ ns之间, 其平均膨胀速度分别为 1.1×10^4 m·s⁻¹和 1.7×10^4 m·s⁻¹; 在等离子体滞止前10 ns的快速聚爆过程中, 表面绝缘金属丝和普通金属丝两侧的平均聚爆速度分别为 5.5×10^5 m·s⁻¹和 9.3×10^5 m·s⁻¹, 表面绝缘一侧等离子体滞止时间小于普通金属丝一侧, 分别为5.9 ns和9.5 ns; 等离子体碰撞分界线偏向于表面绝缘一侧, 滞止时形成的磁流体不稳定性结构类似.

关键词: 条纹激光阴影成像, 表面绝缘, 平面丝阵, Z箍缩

PACS: 52.70.-m, 52.30.-q, 52.59.Qy

DOI: 10.7498/aps.63.235205

1 引言

平面丝阵负载具有结构简单、易于诊断的特点, 最初被用来研究丝阵的融蚀动力学和先驱等离子体的形成过程, 在Nevada大学的Zebra装置(1 MA, 100 ns)上开展了利用平面丝阵负载作为辐射源的Z箍缩内爆实验^[1], Jones等^[2]还提出了基于平面丝阵的黑腔设计, 与其他结构的金属丝阵一样, 都存在较长的融蚀过程, 在早期形成以冕等离子体、融蚀流、先驱等离子体为主体的复杂结构. 单丝电爆炸实验发现, 表面绝缘对冕等离子体的形成具有一定的抑制作用, 能够增加单原子能量沉积^[3-5]. 在“强光一号”装置上(1.3 MA, 100 ns)实施的表面绝缘钨平面丝阵实验发现, 表面绝缘能够对钨平面丝阵早期过程产生深刻的影响, 并能够改变X射线脉冲形状^[6]. 为了更好地研究表面绝缘对钨平面丝阵Z箍缩物理过程的影响, 本文建立了基于半高全宽约为9 ns、波长为532 nm的Nd:YAG

激光器的阴影成像系统, 研究由表面绝缘钨丝和普通钨丝共同组成的混合型平面丝阵负载Z箍缩行为的异同.

2 激光阴影成像系统

阴影成像具有分辨率高、对密度变化边界敏感、图像对比度高等优点, 广泛应用于等离子体动力学过程诊断、高速运动微小碎片测量、材料检测等领域^[7,8]. 对于时间变化尺度小于百纳秒的稠密等离子体变化过程多采用脉冲激光或X射线作为背光光源, 波长越短其穿透能力越强. 一般而言, 脉冲阴影成像有两种工作模式: 一种是背光光源脉宽极短(< 1 ns), 后端采用积分式记录方式, 整个系统的时间分辨由背光光源的脉宽决定; 一种是背光光源脉宽较长(> 10 ns), 后端采用时间分辨相机作为记录设备. 中国工程物理研究院王真等建立了266 nm激光阴影成像系统, 并经陈法新等^[9]加以改进用于丝阵负载Z箍缩等离子体内爆过程诊

* 国家自然科学基金青年基金(批准号: 11105109)和强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室基础研究基金(批准号: SKLIPR1208, SKLIPR1304Z)资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: shengliang@nint.ac.cn

断, 实验中采用脉宽约为 12 ns 的 Nd:YAG 激光器作为背光光源, 后端采用 4 路像增强型电荷耦合器件 (ICCD) 相机记录, 时间分辨受 ICCD 相机电子快门宽度限制, 这种模式同步触发时序复杂, 且不同时刻的 ICCD 相机图像对比度与激光脉冲强度时间变化高度相关, 要获得同一炮不同时刻的高质量图像难度较大. 本文采用两种方式作为激光阴影图像的记录系统, 一种采用 EOS600D 商用单反数码相机, 记录整个激光脉冲持续时间等离子体的积分阴影图像; 另一种采用条纹相机记录, 用来测量等离子体在激光脉冲持续时间的一维时间分辨图像, 此种方式空间分辨率较低.

在“强光一号”装置上建立的激光阴影成像系统如图 1 所示, 由于等离子体密度较高, 532 nm 波长的激光干涉图像无法给出冕等离子体密度的定量分析结果, 可见光分幅相机在入射孔前加 532 nm 陷波滤光片, 获得的图像为等离子体自辐射图像, 用于与阴影图像结果比较分析. 图 1 中 F300 表示焦距为 300 mm 的平凸透镜, 后端成像光路采用 4F 像传递方式设计, 这种像传递方式具有成像效果好、便于控制激光指向稳定性的优点, 并能够在焦点位置附近设置合适的空间滤波器件, 从而有效控制杂散光对成像质量的影响. 需要说明的是, 在实验中条纹相机采用了以下两种狭缝耦合方式: 一种是图 1 中给出的, 利用 4F 成像系统将阴影像传递至漫反射玻璃片上, 由条纹相机主物镜将其成像至狭缝位置, 再由中继透镜将狭缝成像至光阴极上; 另一种直接在阴影成像光路上进行狭缝限光, 光阴级位于像面位置, 这种方式下条纹相机易受杂散光的影响, 需要采用多组限光光阑对杂散光进行控制. 激光阴影成像系统主要性能指标如表 1 所列.

整个光学诊断系统时间关联如图 2 所示, 采用两个 PIN 探测器测量激光光脉冲到达负载的时刻, 并与负载电流信号和 X 光信号进行关联作为主定时系统, 同时利用条纹相机同步触发链路的绝对延迟时间与 X 光信号绝对延迟时间进行比较, 作为辅助定时系统, 两种定时方法之间的差别在 1 ns 左右. 图 2 中所标注时间包括了光程、电缆延迟时间、

仪器延迟时间等, 其中 PIN 探测器的延迟时间计算至负载处.

负载电流由半径为 22.5 cm 的 Rogowski 线圈测量得到, X 射线分别采用距离负载 2.20 m 的 Al 阴极 X-射线 (XRD)(2.5 μm Mylar 膜) 和闪烁体 + 光电管两种方法测量.

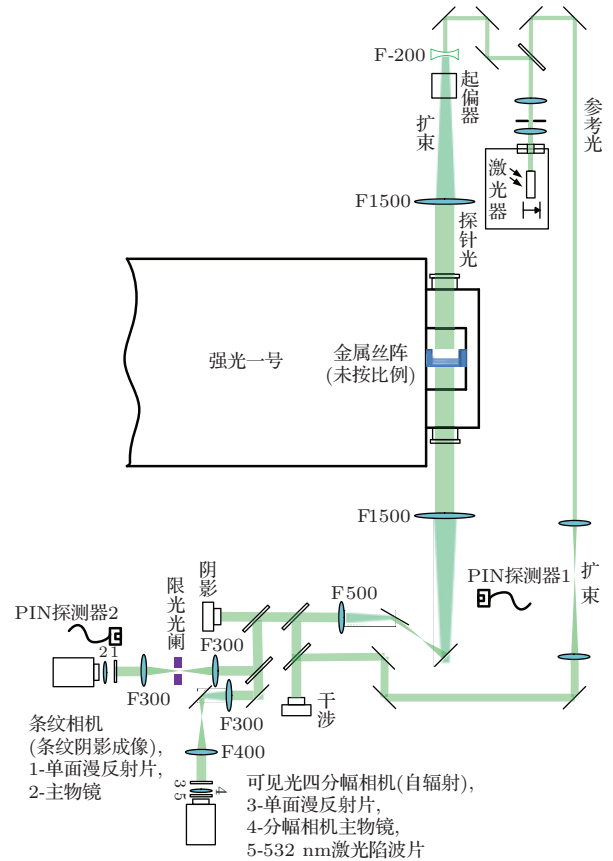


图 1 “强光一号”平面丝阵早期过程光学诊断系统布局示意图

“强光一号”的平面丝阵 Z 箍缩负载在靶室中水平放置 (图 1), 左侧为阴极, 右侧为阳极. 以靶室水平方向中心轴为分界线将平面丝阵分为上下两部分, 上半部由 5 根表面绝缘钨丝组成, 下半部由 5 根普通钨丝组成, 以中心轴为起点上下第 5 根分别为平面丝阵最外侧的表面绝缘钨丝和普通钨丝. 平面丝阵宽度为 15 mm, 钨丝长度为 2 cm, 表面绝缘钨丝和普通钨丝的金属导体直径都为 15 μm, 表面绝缘层为 2 μm 厚的聚酰亚胺薄膜.

表 1 激光阴影成像系统主要性能指标

背光光源 (Nd:YAG 激光器)			条纹相机			EOS600D 单反数码相机	
脉冲半高全宽/ns	波长/nm	能量/mJ	扫描长度/ns	时间分辨/ns·pixel ⁻¹	空间分辨/lp·mm ⁻¹	像素数	工作模式
~ 9	532	~ 50	65	~ 0.095	~ 10	5184×3456	外触发、积分

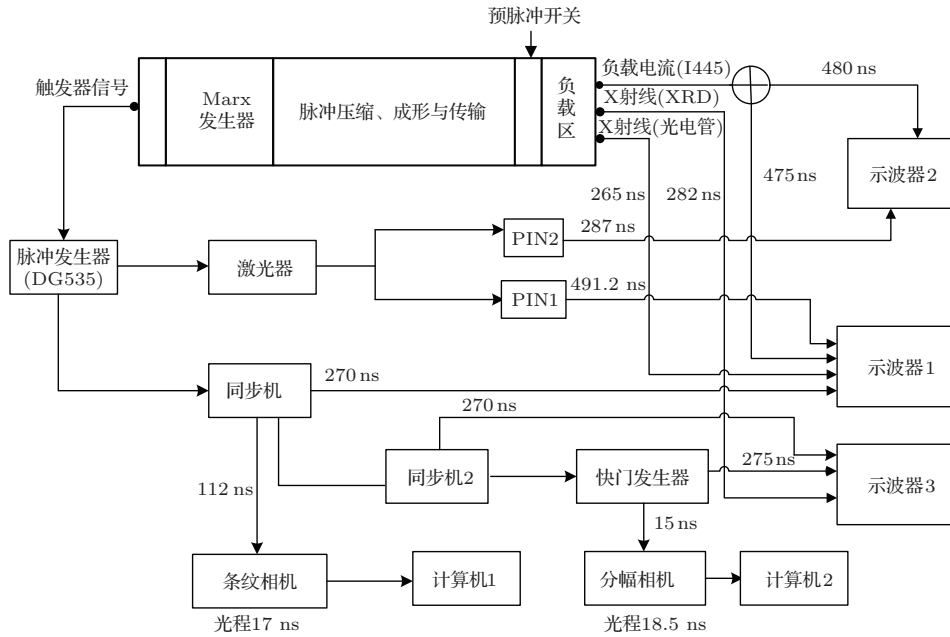


图2 光学诊断系统同步定时示意图

3 实验结果与讨论

图3为表面绝缘混合平面丝阵典型的X射线、负载电流、激光监测信号、条纹相机同步监测信号(14022炮),图3中的时间关系根据图2时间关联计算得到,各炮实验相关参数如表2所列。

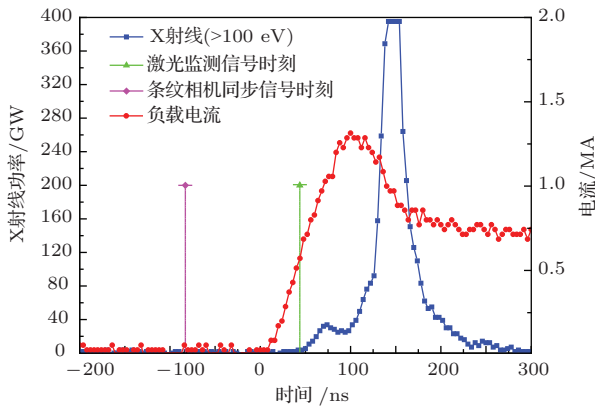


图3 表面绝缘混合平面丝阵典型的X射线、负载电流、激光监测信号、条纹相机同步监测信号(14022炮)

图4(a), (c), (e)为14022炮、14019炮、14023炮(按获得图像的先后时刻排列)条纹激光阴影图像,图4(b), (d), (f)为上述三发的激光阴影图像,图4(g)为可见光分幅相机图像。图4中时间标注 t_c 表示以电流起始时刻为时间参考点的相对时刻, t_x 表示以X射线峰值时刻为时间参考点的相对时刻,内爆时间定义为X射线峰值时刻与电流起始时刻

的时间差,即 $t_c - t_x$ 。

表2 表面绝缘混合平面丝阵实验参数(14037炮对应10根纯钨丝情况)

炮号	负载电流/MA	内爆时间/ns	X射线峰值功率/GW	X射线辐射起始时刻/ns
14019	1.29	144	390	46
14022	1.30	144	394	44
14023	1.29	148	432	44
14029	1.30	148	—	48
14037	1.31	142	492	30

从图4(a)—(d)能够明显看出表面绝缘金属丝一侧和普通金属丝一侧冕等离子体发展的差异,普通金属丝冕等离子体的发展明显要快于表面绝缘金属丝。图4(a)中,最外侧表面绝缘金属丝冕等离子体发展程度与第三根普通金属丝相仿(从外向内),根据平面丝阵电感电流分配模型^[10,11],不同位置金属丝电流比例如图5所示,最外侧金属丝上的电流与内侧第三根金属丝电流之比为1.58。从能量守恒的观点看,欧姆加热能量转换为冕等离子体膨胀动能、用于金属丝状态转换的内能、自发光辐射能,因此表面绝缘金属丝有更多份额的能量用于汽化、电离,这与单丝实验结果结论一致。与单丝实验不同之处为,在全局磁场作用下,Z箍缩早期过程中存在低密度的向内高速运动的融蚀流,表面绝缘最外侧金属丝上的融蚀流发展最快,图4(b)中阳极附近融蚀流已抵达相邻金属丝,而此时普通金

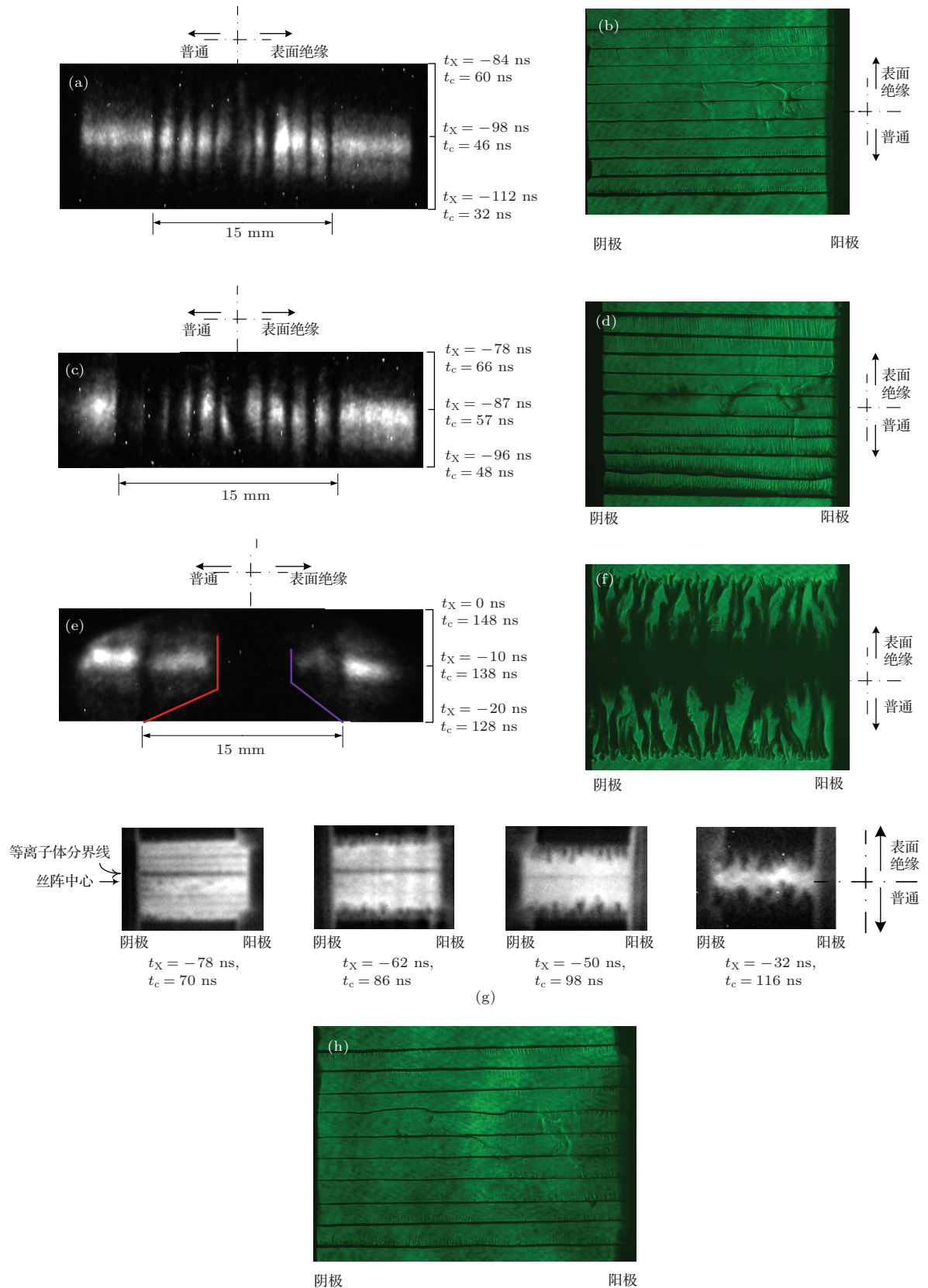


图4 不同时刻的条纹激光阴影图像、激光阴影图像和可见光自辐射图像 (a) 14022 炮条纹激光阴影图像; (b) 14022 炮激光阴影图像, 激光峰值时刻 $t_X = -100$ ns, $t_c = 44$ ns; (c) 14019 炮条纹激光阴影图像; (d) 14019 炮激光阴影图像, 激光峰值时刻 $t_X = -88$ ns, $t_c = 56$ ns; (e) 14023 炮条纹激光阴影图像; (f) 14023 炮激光阴影图像, 激光峰值时刻 $t_X = -10$ ns, $t_c = 138$ ns; (g) 表面绝缘混合平面丝阵自辐射分幅相机图像 (14029 炮); (h) 14037 炮全部纯钨丝平面丝阵激光阴影图像, $t_X = -119$ ns, $t_c = 23$ ns

属丝上相同位置的融蚀流只运动到两根丝中间的位置,说明表面绝缘金属丝被剥离出来的融蚀流质量较低,在全局磁场作用下向内运动速度较高.从图4(c)和(d)可以看到,普通金属丝冕等离子体开始明显向内扩张,形成融蚀流、扩张冕等离子体、稠密冕等离子体等组成的多密度层次复杂质量分布,而表面绝缘一侧金属丝仍是以缓慢膨胀的冕等离子体和高速运动的融蚀流为主的二相结构.需要说明的是,由于易受杂散光的影响,且条纹相机动态范围有限,条纹相机记录的时间分辨阴影图像在空间分辨上仅具有定性分析意义,因此冕等离子体空间分布采用EOS600D记录的积分阴影图像更准确.由图4(b)和(d)得到,最外侧表面绝缘金属丝和普通金属丝冕等离子体在 $t = 44 \text{ ns}$ 到 $t = 56 \text{ ns}$ 之间的平均膨胀速度分别为 $1.1 \times 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $1.7 \times 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.从图4(e)可以看出,表面绝缘一侧等离子体滞止时间比普通金属丝一侧要短,分别为 5.9 ns 和 9.5 ns ,等离子体滞止过程中心时刻比X射线峰值时刻早约 10 ns ,由图4(e)可得滞止前快速向内聚爆过程中表面绝缘金属丝和普通金属丝两侧的平均速度分别为 $5.5 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $9.3 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,说明在此过程中表面绝缘一侧被加速的等离子体质量较大、剩余质量较少,从而导致在表面绝缘一侧滞止过程较短,易发生飞散,这些现象与在融蚀过程中表面绝缘一侧能量沉积更高的推论是一致的.在14029炮的自辐射可见光图像中能够更明显地看到表面绝缘和普通金属丝等离子体的分界线,如图4(g)所示.图4(f)中两侧等离子体碰撞位置偏向表面绝缘一侧,距离丝阵中心约 0.6 mm ,图4(g)中表面绝缘和普通金属丝等离子体分界线在表面绝缘第五根金属丝位置附近,偏离丝阵中心约 0.8 mm ,两者定性上一致,这与普通金属丝一侧冕等离子体发展较快的结论是一致的.

14037炮为10根金属丝全部为纯钨丝的平面丝阵,图4(h)为获得的激光阴影图像.从图4(h)可以看出,丝阵中心轴两侧呈对称性发展,与混合丝阵中表面绝缘一侧的冕等离子体得到抑制的非对称性结构不同.在 $t_c = 23 \text{ ns}$ 时,14037炮最外侧金属丝冕等离子体直径约为 0.15 mm ,而图4(b)中, $t_c = 44 \text{ ns}$ 时,最外侧表面绝缘金属丝冕等离子体直径仅为 0.08 mm ,最外侧普通金属丝冕等离子体直径约为 0.3 mm ,这表明系表面绝缘产生的冕等离子体抑制作用.混合丝阵的X射线峰值功率明显小于全部为钨金属丝的情况(表2),这可能是

因为混合丝阵负载破坏了等离子体内爆过程的对称性.

表面绝缘一侧尽管参与内爆等离子体质量较大,但其速度较慢,滞止前等离子体动能与普通金属丝一侧相比并无优势,因此在文献[6]的对比实验中X射线产额变化不大,滞止时间短,对缩短X射线脉宽有一定作用.从图4(f)可以看出,表面绝缘一侧的磁流体发展波长比普通金属丝一侧略小,但总体看来结构相仿,即在金属丝中初始能量沉积的变大并不会对磁流体不稳定性的发展带来显著影响,磁流体不稳定性的发展可能主要受磁场构型的影响,通过设计特殊负载结构,改变丝阵中的磁场构型,如Hall等[12]提出的螺旋结构丝阵,对磁流体不稳定性发展过程进行调制,或许是提高X射线产额的一条途径.

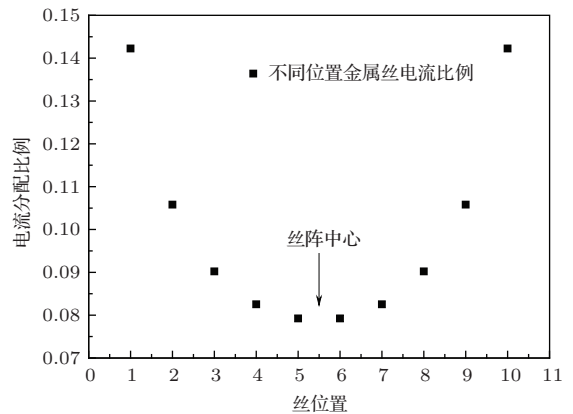


图5 根据电感电流分配模型计算得到的不同位置金属丝上电流分配比例

4 结 论

本文建立了基于条纹相机和商用单反数码相机两种记录方式的激光阴影成像系统,这两种记录方式获得的信息在时间分辨和空间分辨上具有互补性,结合其他的测量方法,如X射线、电参数、可见光自辐射等,对同一丝阵上的表面绝缘金属丝和普通金属丝在Z箍缩不同阶段的差异进行了测量,即使在全局磁场作用下,表面绝缘仍对冕等离子体的发展具有一定的抑制作用.从目前的实验结果看,表面绝缘能够增加金属丝中的能量沉积,从而对丝阵Z箍缩的融蚀、内爆、滞止各个过程产生影响,但对磁流体不稳定性发展和X射线产额影响不大,特殊的磁场构型对Z箍缩物理过程的影响将在下一步的研究计划中实施.

本工作是在“强光一号”加速器上完成,在此向加速器运行维护人员的辛勤劳动表示感谢!

参考文献

- [1] Kantsyrev V L, Rudakov L I, Safronova A S, Fedin D A, Ivanov V V, Velikovich A L, Esaulov A A, Chuvatin A S, Williamson K, Quart N D, Nalajala V, Osborne G, Shrestha I, Yilmaz M F, Pokala S, Laca P J, Cowan T E 2006 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **34** 2295
- [2] Jones B, Ampleford D J, Vesey R A, Cuneo M E, Coverdale C A, Waisman E M, Jones M C, Fowler W E, Stygar W A, Serrano J D, Vigil M P, Esaulov A A, Kantsyrev V L, Safronova A S, Williamson K M, Chuvatin A S, Rudakov L I 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 125001
- [3] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Struve K W, McDaniel D H 2005 *Phys. Rev. Lett.* **94** 035004
- [4] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Struve K W 2008 *Phys. Rev. E* **77** 056406
- [5] Stephens J, Neuber A, Kistiansen M 2012 *Phys. Plasmas* **19** 032702
- [6] Sheng L, Li Y, Hei D W, Yuan Y, Peng B D, Wang L P, Li M, Zhang M, Wei F L, Zhao J Z 2014 *High Power Laser Particle Beams* **26** 075003 (in Chinese) [盛亮, 李阳, 黑东炜, 袁媛, 彭博栋, 王亮平, 李沫, 张美, 魏福利, 赵吉祯 2014 强激光与粒子束 **26** 075003]
- [7] Wang C, Zheng W D, Fang Z H, Sun J R, Wang W, Xiong J, Fu S Z, Gu Y, Wang S J, Qiao X M, Zhang G P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4767 (in Chinese) [王琛, 郑无敌, 方智恒, 孙今人, 王伟, 熊俊, 傅思祖, 顾援, 王世绩, 乔秀梅, 张国平 2010 物理学报 **59** 4767]
- [8] Liu Y Q, Zhao X S, Lei H L, Xie D, Gao D Z 2010 *High Power Laser Particle Beams* **22** 2880 (in Chinese) [刘元琼, 赵学森, 雷海乐, 谢端, 高党忠 2010 强激光与粒子束 **22** 2880]
- [9] Chen F X, Feng J H, Li L B, Yang J L, Zhou L, Xu R K, Xu Z P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 045204 (in Chinese) [陈法新, 冯璟华, 李林波, 杨建伦, 周林, 徐荣昆, 许泽平 2013 物理学报 **62** 045204]
- [10] Esaulov A A, Velikovich A L, Kantsyrev V L, Mehlhorn T A, Cuneo M E 2006 *Phys. Plasmas* **13** 120701
- [11] Sheng L, Wang L P, Wu J, Li Y, Peng B D, Zhang M 2011 *Chin. Phys. B* **20** 055202
- [12] Hall G N, Chittenden J P, Bland S N, Lebedev S V, Bott S C, Jennings C, Palmer J B A, Suzuki-Vidal F 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 065003

Laser shadowgraphy diagnostics for insulated-ordinary mixed planar wire array Z pinches*

Sheng Liang[†] Peng Bo-Dong Yuan Yuan Zhang Mei Li Kui-Nian Zhang Xin-Jun
Zhao Chen Zhao Ji-Zhen Li Mo Wang Pei-Wei Li Yang

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

(Received 23 May 2014; revised manuscript received 15 July 2014)

Abstract

A laser shadowgraphy system was built based on a Nd:YAG laser backlight with a half width of 9 ns and a wavelength of 532 nm. It has the capacity of time resolution and integration simultaneously during the laser lighting time by utilizing a streak camera and a commercial digital camera as the image recording devices. Experimental study of the insulated-ordinary mixed planar wire array Z pinches was carried out on the Qiangguang-I facility. Experimental results indicate that the expansion of corona plasma of the insulated tungsten wires is slower than that of ordinary wires over the ablation stage. Average velocities of the insulated wire and the ordinary wire located at the array outmost edge are $1.1 \times 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $1.7 \times 10^4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ between $t = 44 \text{ ns}$ and $t = 56 \text{ ns}$ respectively. In the fastest implosion stage of 10 ns just before the stagnant time, the average imploding velocities were $5.5 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $9.3 \times 10^5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ respectively for the plasma on the insulated wires side and the ordinary wires side. The duration of stagnant stage on the insulated wires side is 5.9 ns, while it is 9.5 ns on the ordinary wires side. The collision boundary is deflected to the insulated wires side. A similar magneto Rayleigh-Taylor Instability structure can be observed on the both sides at the stagnant time.

Keywords: streaked laser shadowgraphy, surface insulating, planar wire array, Z pinch

PACS: 52.70.-m, 52.30.-q, 52.59.Qy

DOI: [10.7498/aps.63.235205](https://doi.org/10.7498/aps.63.235205)

* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11105109) and the Basic Research Foundation of State Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, China (Grant Nos. SKLIPR1208, SKLIPR1304Z).

[†] Corresponding author. E-mail: shengliang@nint.ac.cn