

# 铝-钨丝混编阵的 Z-箍缩实验研究\*

宁 成<sup>1)†</sup> 李正宏<sup>1)</sup> 华欣生<sup>1)</sup> 徐荣昆<sup>1)</sup> 彭先觉<sup>1)</sup>

许泽平<sup>1)</sup> 杨建伦<sup>1)</sup> 郭 存<sup>1)</sup> 蒋世伦<sup>1)</sup> 丰树平<sup>1)</sup>

杨礼兵<sup>1)</sup> 晏成立<sup>1)</sup> 宋凤军<sup>1)</sup> V. P. Smirnov<sup>2)</sup>

Yu. G. Kalinin<sup>2)</sup> A. S. Kingsep<sup>2)</sup> A. S. Chernenko<sup>2)</sup> E. V. Grabovsky<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>中国工程物理研究院 绵阳 621900)

<sup>2)</sup>Russia Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia)

<sup>3)</sup>Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research, Troitsk, Russia)

(2003 年 7 月 18 日收到, 2003 年 9 月 17 日收到修改稿)

利用铝丝和钨丝混合编制的丝阵作为 Z-箍缩的负载,在俄罗斯 Kurchatov 研究所的 S-300 强流装置上对其 Z-箍缩过程进行了实验研究,并与纯铝丝阵和纯钨丝阵的实验结果进行了比较.不同材料组成的丝阵的 Z-箍缩 x 射线能谱之间有明显差异,混编丝阵的铝 K 壳层的 x 射线辐射强度比纯铝丝阵的弱,在纯钨丝阵 Z-箍缩中没有发现波长小于 1.6nm 的线辐射.混编丝阵 Z-箍缩的 x 射线发光区域比纯铝丝阵的小,但比纯钨丝阵的大,混编丝阵的 x 射线产额比纯铝丝阵的大,但比纯钨丝阵的略低.在驱动电流为 2.5—2.8MA 条件下, Z-箍缩的径向收缩比为 4—5, x 射线辐射脉冲脉宽为 25ns 左右,峰值为 0.3—0.5TW,总能量为 10—20kJ.激光探针的阴影像显示了丝阵等离子体形成的细致过程,还表明了等离子体的边界不够清晰,其不稳定性有明显的发展,内部有丰富的结构.

关键词: Z-箍缩,混编丝阵, S-300 强流装置

PACC: 5225P, 5230

## 1. 引 言

尽管在丝阵的 Z-箍缩实验中已经获得了很高的 x 射线辐射功率和产额,但是要实现 Z-箍缩驱动的 ICF (inertial confinement fusion), 还需要大幅度地提高其 x 射线辐射功率和产额,并且要使 x 射线辐射脉冲符合其对氘氚靶丸等熵压缩和压缩的均匀性和对称性以及光谱结构等方面的要求<sup>[1-5]</sup>. 因此,一方面要发展脉冲功率技术,提高 Z-箍缩的驱动电流水平,另一方面要深入研究 Z-箍缩内爆物理过程、x 射线辐射脉冲形状和谱特征及其影响因素. Z-箍缩过程是一个高度的自组织过程,对于一定的加速器,通常仅能通过预先改变负载的几何结构和材料组成(包括材料的类别、数量和质量)来影响、控制、改善 Z-箍缩内爆动力学过程、辐射脉冲形状和谱结构.目前,就负载几何结构变化对 Z-箍缩内爆动力学过程

和辐射脉冲形状的影响进行了较多的研究,发现双层丝阵等复合负载能有效地抑制 Z-箍缩内爆过程中磁流体力学不稳定性的发展,使收缩比增大,辐射脉冲宽度缩小,辐射功率大幅度提高<sup>[6-8]</sup>.但对丝阵材料组成对 Z-箍缩内爆动力学过程、辐射脉冲形状和谱结构的影响研究开展尚不多. Lebedev 等人<sup>[9]</sup>出于研究丝阵中的电流分布和在丝阵中掺杂不同元素材料对控制内爆过程和调制辐射谱结构的可能性而对镍-铜、铝-钨丝等混编丝阵的 Z-箍缩过程进行了初步实验研究. 2003 年初,我们在俄罗斯 Kurchatov 研究所的 S-300 强流发生器上也开展了铝-钨丝混编丝阵的 Z-箍缩实验研究,本文即报告这方面的初步实验结果.

## 2. 实验安排

S-300 强流发生器由 8 个模块组成,其设计电流

\* 国家自然科学基金(批准号:10035030 和 10375010)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: ning\_cheng@mail.iapcm.ac.cn

峰值可达 4MA, 上升时间为 100ns, 建成于 1995 年. 每个模块由 80 个电容器组成, 每个电容器的电容量为  $0.4\mu\text{F}$ , 额定电压为 75kV, 但在实验时电压仅充到 44kV. S-300 强流发生器的额定储能为 720kJ, 但进行实验时储能为 247.8kJ. 中国工程物理研究院和俄罗斯 Kurchatov 研究所在 S-300 强流装置上进行 Z-箍缩联合实验, 希望获得驱动电流峰值在 3MA 左右的单质材料铝和钨丝阵内爆的总体特征(包括负载电流电压波形、箍缩动力学过程和 x 射线辐射的物理图像等), 以及丝阵材料组成变化(铝-钨混编丝阵)对内爆过程和辐射谱的影响. 此对中俄双方测试结果, 检验中方所研制丝阵的可用性; 为 Z-箍缩过程的数值模拟提供校验的实验数据. 诊断系统如图 1 所示. 此外还有监测 Marx 发生器、中储、磁绝缘传输线和负载的电流、电压等设备. x 射线辐射功率仪的技术指标参见文献 [10]. 它们的布置如图 1 所示. 真空靶室的直径约为 1m. 除云母 x 射线晶体谱仪置于真空靶室外, 别的测试设备均置于靶室的测试窗口上. 实验中所用的丝阵直径和高均为 10mm. 本文主要涉及铝-钨混编丝阵的实验结果.

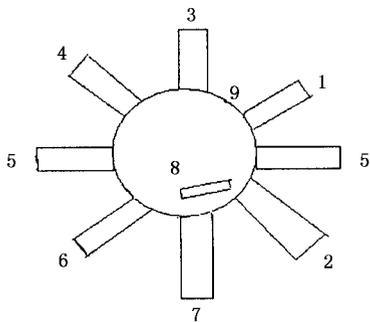


图1 测试系统布置示意图 1 为 x 射线辐射功率仪<sup>[10]</sup>, 2 为可见光条纹相机, 3 为可见光三分幅照相, 4 为多通道 x 射线光谱仪, 5 为激光阴影五分幅成像系统, 6 为 x 射线十分幅成像系统, 7 为针孔相机, 8 为云母 x 射线晶体谱仪, 9 为真空靶室

### 3. 实验结果与讨论

图 2 是由多通道 x 射线光谱仪测得的纯铝、铝-钨混编和纯钨丝阵在 Z-箍缩过程中辐射出的 x 射线能谱图. 纯铝丝阵由 60 根直径为  $18\mu\text{m}$  的铝丝组成; 铝-钨混编丝阵由 30 根直径为  $18\mu\text{m}$  的铝丝和 30 根直径为  $6\mu\text{m}$  的钨丝相间混编而成. 铝、钨的质量比为 1.255. 纯钨丝阵由 80 根直径为  $6\mu\text{m}$  的钨丝组成. 它们的线质量分别为 412, 370, 431 $\mu\text{g}/\text{cm}$ , 比较接近.

驱动电流的峰值为 2.5—2.8MA. 从图 2 可见, 丝阵的材料及其组成对 x 射线的辐射能谱有明显的影. 在纯铝丝阵中, 光子能量为 60eV 附近的 x 射线辐射最强; 在混编丝阵和纯钨丝阵中光子能量均为 220eV 附近的 x 射线辐射最强. 在所测量的光谱范围内, 纯钨丝阵的 x 射线辐射最强. 实验中它们辐射出的 x 射线能量分别为 7, 13 和 14kJ 左右.

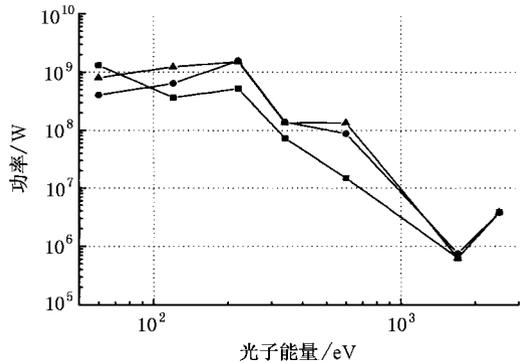


图2 x 射线辐射能谱分布图 ■ 为 60 根铝丝( $18\mu\text{m}$ )阵, ● 为 30 根铝丝( $18\mu\text{m}$ )+30 根钨丝( $6\mu\text{m}$ )阵 ▲ 为 80 根钨丝( $6\mu\text{m}$ )阵

图 3 是由 60 根直径为  $18\mu\text{m}$  的铝丝组成的纯铝丝阵在 Z-箍缩过程中辐射出的线谱构成情况. 它是由云母 x 射线晶体谱仪拍摄到的. 左边第一条谱线对应的能量为 2.3keV, 右边最后一条谱线对应的能量为 0.78keV. 铝的 K 壳层两个电子的电离能分别为 2.08605 和 2.30416keV<sup>[11]</sup>. 铝的 K 壳层辐射的特征谱线(谱线符号和能量)如下<sup>[12]</sup>:  $\text{KL}_1$  为 1.43894keV,  $\text{KL}_2$  为 1.486295keV,  $\text{KL}_3$  为 1.486708keV,  $\text{KM}_1$  为 1.55757keV,  $\text{KM}_2$  为 1.55757keV,  $\text{KM}_3$  为 1.55757keV,  $\text{KM}_4$  为 1.55757keV,  $\text{KM}_5$  为 1.55757keV, K edge 为 1.559893keV, K edge(c)为 1.55953keV. 对比图 3 中谱线能量可知, 左起最亮的第二条谱线(其能量为 1.56keV)是铝的 KM 和 K 系列谱线的集合, 但别的谱线需要深入研究铝原子的各种可能跃迁及其概率后才能确认. 这是一项难度很大的工作. 其中一些谱线还可能是电极和电流回路材料的溅射所引起的杂质谱线, 也可能是强磁场的影响和等离子体的运动, 使原子的谱线发生了移动. 并且, 在 Z-箍缩过程中或在 Z-箍缩过程中的某一时刻均存在不同离化态的铝离子, 因此谱线的跃迁(也就是光谱)非常复杂. 但该 Z-箍缩已使铝原子达到 K 壳层电离, 产生 K 壳层辐射. 另外, 在实验中发现, 在铝-钨混编丝阵中测

到的谱线要弱(暗)得多,在纯钨丝阵中没有测到波长小于 1.6nm 的谱线.

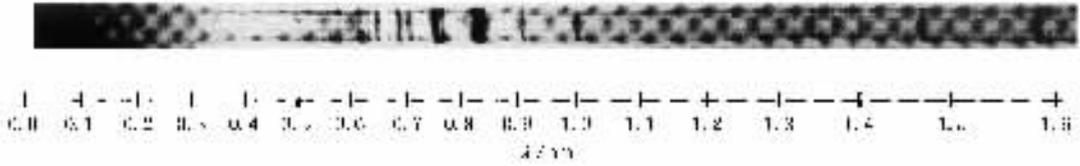


图 3 纯铝丝阵的 x 射线辐射线谱(下面是线谱的波长标尺)

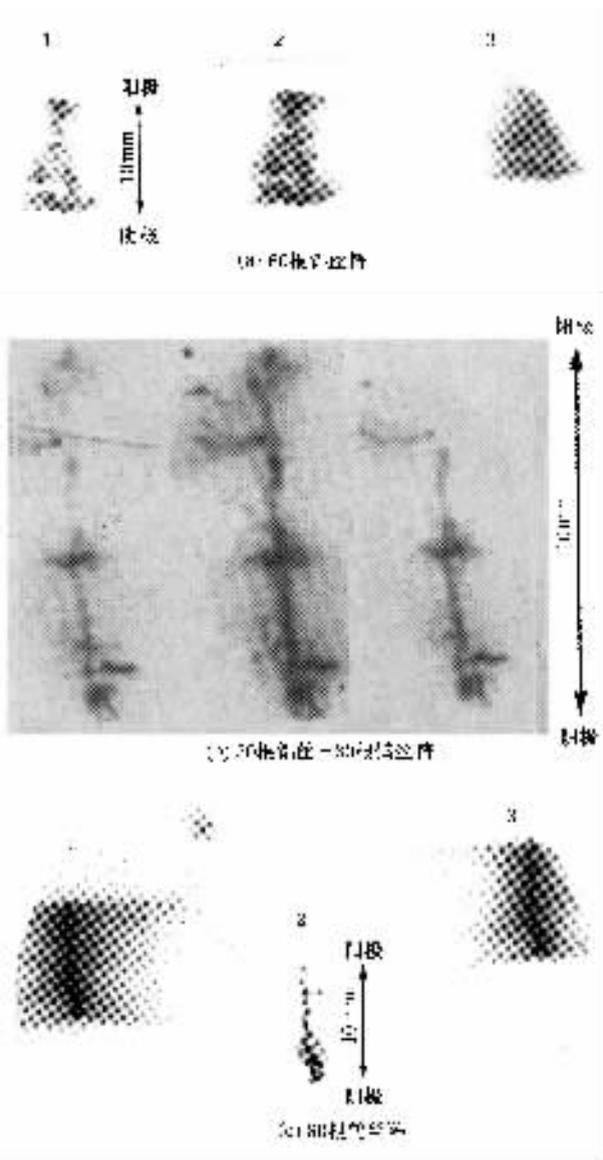


图 4 Z-箍缩过程的针孔相机图片 (a)为纯铝丝阵,1,2,3 所采用的 Mylar 膜的厚度分别为 5,12,0 $\mu$ m;(b)为混编丝阵,三幅图均采用 12 $\mu$ m 的 Mylar 膜 (c)为纯钨丝阵,1,2,3 所采用的 Mylar 膜的厚度同图(a)

图 4 是针孔相机拍摄到的照片.丝阵的组成与图 2 中的情况完全相对应.从图 4 可以看到,纯铝丝阵的发光区域最大,混编丝阵的次之,纯钨的最小,

相应地反映出它们箍缩状况的差异,纯钨丝阵箍缩得最好,混编丝阵的次之,纯铝的最差.这与它们的 x 射线辐射产额的相对大小符合.这也反映了不同材料的等离子体形态和特征的差异,同时也表明,就箍缩的稳定性而言,钨作为丝阵的材料较合适.

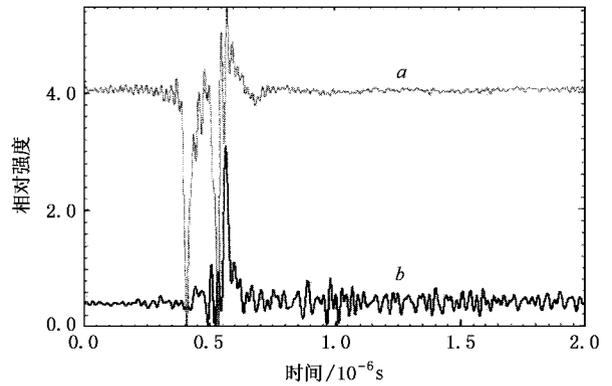


图 5 负载电压(曲线 a)和辐射功率(曲线 b)随时间的变化曲线

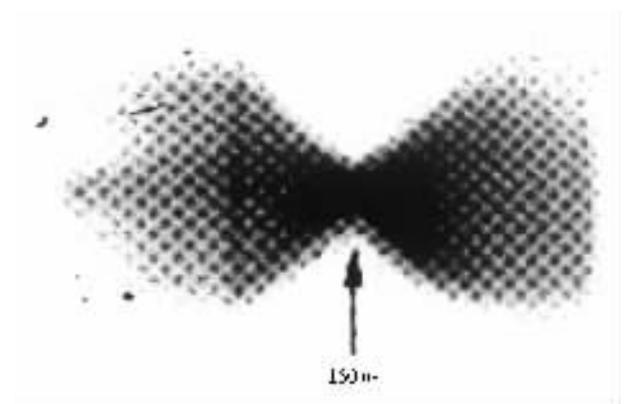


图 6 Z-箍缩过程的可见光条纹像

图 5 是负载(30 铝(18 $\mu$ m)+30 钨(6 $\mu$ m))的电压波形曲线和它在箍缩过程中辐射出的 x 射线功率随时间的变化曲线(曲线小幅振荡是测试环境中的电磁干扰引起的).由图 5 可见,x 射线功率在负载加上高电压 170ns 左右(已扣除电缆长短差异的影响)后达到最大值(也就是等离子体箍缩到心时刻,

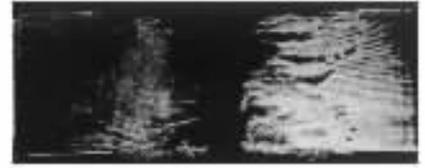
收缩比达到最大),经标定其最大值约为  $0.5TW_x$ 。 $x$  射线辐射脉冲的半高宽(FWHM)为  $25ns$  左右(实验中发现它与纯钨丝阵的差不多,但比纯铝丝阵的略小)。图 6 是可见光条纹相机拍摄到的 Z-箍缩动态过程图。它非常直观地示出 Z-箍缩的全过程:“潜伏”期、快速箍缩、滞止阶段和飞散膨胀阶段。从图 6 中可知负载的箍缩收缩比为 4—5,箍缩的平均速度为  $3 \times 10^4 m/s$ ;图 6 中标出收缩比最大时所对应的时刻为  $160ns$ ,而图 5 中给出的为  $170ns$  左右。这时间的差异反映了可见光条纹像给出的到心时刻较真正的 Z-箍缩到心时刻早,亦即从可见光条纹像来看它已经箍缩到心,但如果从  $x$  射线条纹像来看它还在箍缩,还没有箍缩到心。

以上给出的实验结果都是利用 Z-箍缩等离子体发射出的  $x$  射线和/或可见光而进行被动方式测量得到的,它们都不能很好地反映出等离子体内部的信息。下面给出利用激光探针(YAG:Nd 激光器,二倍频激光波长为  $532nm$ ,每一激光束能量为  $20—25mJ$ )进行主动方式测量,并可以反映等离子体内部信息的测量结果。激光探针测量系统十分庞大而复杂,该套测量系统详见文献[13]。图 7 是铝-钨混编丝阵 Z-箍缩等离子体激光探针系列阴影图,每幅图相隔  $10ns$ 。第三幅是等离子体箍缩到心附近时刻的阴影像。图 7 中黑暗区域为等离子体的高温高密度不透光区域,即该区域对探针激光的吸收很强,从而激光几乎全被衰减掉,显示为黑暗。从图 7 可见(特别是在计算机将图形放大后更清楚),等离子体的内部结构十分丰富,等离子体的外界面不是光滑整齐的,其界面上不稳定性的发展情况清晰可见,等离子体的外界面在本文测试条件下很难明确界定,在主等离子体的周围还有稀薄等离子体。它展示了 Z-箍缩等离子体在箍缩过程中的外形变化特征和丰富的内部结构及其发展变化情况。

在本次联合实验的激光探针实验结果中,从其 5 分幅阴影像中能看出丝阵等离子体初始形成过程的仅有一发( $12$  铝( $30\mu m$ )+ $12$  钨( $10\mu m$ )),其结果中的两幅如图 8 所示(同样,其在计算机上放大后看更为清楚)。从  $t = 47ns$  时刻的阴影像可以清楚地看出,每根丝(图中较粗的黑影代表铝丝,较细的黑影代表钨丝)表面上的等离子体电晕一丝一丝地向对称中心漂移;在驱动电流流过丝阵时,不同丝之间的消融速率不同,同一根丝上不同地方的消融速率也不相同,且有的丝已经断掉(图中已标明),有的丝位



(a) 97ns



(b) 107ns



(c) 117ns



(d) 127ns



(e) 137ns

图 7 铝-钨混编丝阵的 Z-箍缩等离子体激光探针阴影图

置发生了移动,每根丝主要在朝向对称中心的一面逐渐消融,直到丝被融断为止,但在丝的外侧面也能看到一些凹凸不平的表面,说明丝的外侧面也有一些微弱的消融。从  $t = 57ns$  和  $t = 67ns$  两幅阴影像(因篇幅所限,这里没有附出)看,有些丝之间的等离子体已经弥合,但从总体上还没有完全弥合好,图中断开的铝丝还清晰可见,左外侧面可以看到流体力学不稳定性在发展。到  $t = 77ns$  后,各丝之间的等离子体已较好地弥合,但等离子体在径向和轴向的分

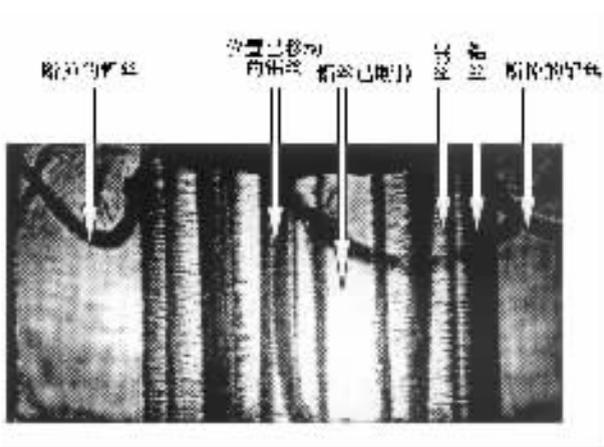
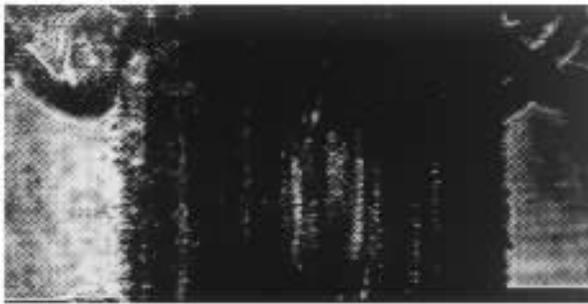
(a)  $t = 47\text{ns}$ (b)  $t = 77\text{ns}$ 

图8 铝-钨混编丝阵的 Z-箍缩等离子体在不同时刻的阴影图

布不是十分均匀.同时还可以看到,流体力学不稳定性有了进一步的发展,但在左侧面的发展更快一些,已断开的铝丝仍然清晰可见.足见丝阵等离子体的形成及其内爆是很复杂的过程.对混编丝阵和单一材料丝阵<sup>[14]</sup>Z-箍缩,在等离子体形成阶段均存在芯-晕等离子体结构,它们的电晕均成丝地向对称中心轴漂移,形成先驱等离子体,但因不同材料的丝之间的导电性能和丝的粗细的差异,会导致丝的消融、电晕漂移、芯-晕等离子体结构等方面的差异.这些方面今后还需深入研究.

丝阵(负载)材料组成的改变对其箍缩过程的影响不难理解.不同材料的导电性能不同,导电性能好的丝开始时通过绝大部分的电流,因而它比导电性能差的丝先熔化和箍缩.当它箍缩到一定程度后,因其电感(或许还有反常电阻)增加,而使大部分电流转到导电性能较差的丝(等离子体)中流过,从而使它继续熔化和箍缩.在铝-钨混编丝阵的 Z-箍缩中,铝的导电性能比钨的好,且铝丝的横截面积比钨丝的大,因此铝丝的电阻要比钨丝的小得多,从而开始时铝丝中通过绝大部分的电流,它熔化得快,并可能

先箍缩(但与丝的相对粗细有关).因此,通过改变丝阵(负载)的材料构成,可以控制 Z-箍缩动力学过程,从而 x 射线辐射的脉冲形状也就相应地改变.另一方面,不同的材料,其原子结构及其电离能就不同,因此,丝阵材料的种类、数量和质量等的改变必定要对其 x 射线辐射的光谱结构产生影响,从而可以通过改变组成丝阵的材料种类、数量和质量来产生满足某些特定光谱结构要求的 x 射线辐射(如 ICF 中要求的平衡 x 射线辐射).联合实验的打靶发数很有限,这里的实验是初步的,今后还要对组成丝阵的材料种类、数量和质量的各种组合,以及不同材料组成的复合负载的 Z-箍缩过程,及其辐射特性进行大量研究,以摸清其规律.

## 4. 结 论

在 Kurchatov 研究所的 S-300 强流发生器上,对铝-钨丝混编阵的 Z-箍缩动力学过程及其 x 射线辐射特征进行了初步研究,得到了一些实验数据和 Z-箍缩物理图像.丝阵的材料组成对丝阵的 Z-箍缩内爆动力学过程和辐射谱有较大影响.首先丝阵材料的组成对 Z-箍缩动力学过程有明显的影 响,混编丝阵的 x 射线发光区域比纯铝丝阵的小,但比纯钨丝阵的大,这实际上表明了箍缩状况的差异,同时这与它们辐射产额的相对大小相符合.其次组成丝阵的材料的变化对 x 射线辐射功率谱也有明显的影 响,混编丝阵的铝 K 壳层的 x 射线辐射强度比纯铝丝阵的弱,且在纯钨丝阵的实验中 没有观测到波长小于 1.6nm 的 x 射线辐射.铝-钨混编丝阵 Z-箍缩的 x 射线脉冲半高宽为 25ns 左右,与纯钨丝的相近,但比纯铝丝的略小.当驱动电流在 2.5—2.8MA 条件下, Z-箍缩的径向收缩比为 4—5, x 射线辐射脉冲的最大功率在 0.3—0.5TW 左右,辐射总能量为 10—20kJ.激光探针阴影像表明,在等离子体形成阶段存在芯-晕等离子体结构,它们的电晕成丝地向对称中心轴漂移;在 Z-箍缩过程中,磁流体力学不稳定性有明显的发展, Z-箍缩等离子体的界面不够光滑,也不够清晰,在主等离子体的周围还有稀薄等离子体,从而表现出非常丰富而复杂的内部结构.

曾与杨震华研究员和丁宁研究员就本文进行过有益的讨论,他们提出了一些修改意见.就铝丝阵 Z-箍缩辐射线谱方面曾与方泉玉研究员、孟续军研究员、颜君副研究员进行过讨论.特此一并致谢.

- [ 1 ] Yonas G 1998 *Sci. Am.* August 23  
 [ 2 ] Vesey R A *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 35005-1  
 [ 3 ] Bennett G R *et al* 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 245002-1  
 [ 4 ] Hanson D L *et al* 2002 *Phys. Plasmas* **9** 2173  
 [ 5 ] Ning C , Yang Z H and Ding N 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 415 ( in Chinese ) [ 宁 成、杨震华、丁 宁 2003 物理学报 **52** 415 ]  
 [ 6 ] Deeney C *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4883  
 [ 7 ] Sze H *et al* 2000 *Phys. Plasmas* **7** 4223  
 [ 8 ] Deeney C *et al* 1993 *Phys. Fluids B* **5** 992  
 [ 9 ] Lebedev S V *et al* 2002 *Phys. Plasmas* **9** 2293  
 [ 10 ] Xu R K *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1203 [ 徐荣昆等 2003 物理学报 **52** 1203 ]  
 [ 11 ] Cowan R D 1981 *The Theory of Atomic Structure and Spectra* ( California : California University Press ) p12  
 [ 12 ] Deslattes R D and Kessler E G Jr 2003 *Rev. Mod. Phys.* **75** 35  
 [ 13 ] Kalinin Yu G *et al* 2002 *Plasma Phys. Rep.* **28** 790  
 [ 14 ] Lebedev S V *et al* 2001 *Phys. Plasmas* **8** 3734

## Experimental studies of Z-pinches of mixed wire array with aluminum and tungsten<sup>\*</sup>

Ning Cheng<sup>1)†</sup> Li Zheng-Hong<sup>1)</sup> Hua Xin-Sheng<sup>1)</sup> Xu Rong-Kun<sup>1)</sup>

Peng Xian-Jue<sup>1)</sup> Xu Ze-Ping<sup>1)</sup> Yang Jian-Lun<sup>1)</sup> Guo Cun<sup>1)</sup> Jiang Shi-Lun<sup>1)</sup>

Feng Shu-Ping<sup>1)</sup> Yang Li-Bing<sup>1)</sup> Yan Cheng-Li<sup>1)</sup> Song Feng-Jun<sup>1)</sup>

V. P. Smirnov<sup>2)</sup> Yu. G. Kalinin<sup>2)</sup> A. S. Kingsep<sup>2)</sup> A. S. Chernenko<sup>2)</sup> E. V. Grabovsky<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> ( China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China )

<sup>2)</sup> ( Russia Research Center " Kurchatov Institute " , Moscow , Russia )

<sup>3)</sup> ( Troitsk Institute for Innovation and Fusion Research , Troitsk , Russia )

( Received 18 July 2003 ; revised manuscript received 17 September 2003 )

### Abstract

In the form of joint experiment between China and Russia , the experimental studies of Z-pinches of mixed wire array of aluminum ( A1 ) and tungsten ( W ) were carried out on S-300 generator , which was located on Kurchatov Institute of Russia . The experimental results were compared with those of single A1 array and single W array , respectively . There are obvious difference between mixed one and single one in their photon spectral distributions . The intensity of K-series emission lines from the mixed wire array Z-pinch is lower than that from single A1 array . The radiated lines with wavelengths less than 1.6nm were not found in single W array Z-pinches . In the Z-pinch processes , the area radiating x-rays in mixed wire array is smaller than that of single A1 array , but is larger than that of single W array . The radiated energy from mixed wire array Z-pinch is higher than that from single A1 array , but is slightly lower than that from single W array . The FWHM of x-ray pulse with a maximal power 0.3—0.5TW and total energy 10—20kJ is about 25ns , which radiated from Z-pinches with a radial convergence of 4—5 on S-300 generator . The shadow photograph of the mixed wire-array Z-pinch plasma by laser probe shows that the core-corona configuration was formed and the corona was moving toward the center axis during the wire-array plasma formation , that the interface of the plasma is not clear , and that there are a number of structures inside . They also suggests that there was an obvious development of Magneto Rayleigh-Taylor instability in the Z-pinch process as well .

**Keywords :** Z-pinch , mixed wire array , S-300 generator

**PACC :** 5225P , 5230

<sup>\*</sup> Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 10035030 and 10375010 ).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : ning\_cheng@mail.iapcm.ac.cn