

# 双层丝阵 Z 箍缩电流分配实验研究\*

叶繁<sup>†</sup> 薛飞彪 褚衍运 司粉妮 胡青元 宁家敏 周林  
杨建伦 徐荣昆 李正宏 许泽平

(中国工程物理研究院, 核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2013年1月22日收到; 2013年4月30日收到修改稿)

负载内外层电流分配是决定双层丝阵 Z 箍缩内爆动力学模式的关键因素. 在“强光一号”装置上, 利用微型磁探针系统定量测量了双层钨丝阵三个重要径向位置点的电流, 获得了其在驱动电流开始上升至驱动电流达到峰值之前 20ns 这一阶段内的时间演化行为. 实验使用的双层钨丝阵负载高度为 20 mm、单丝直径为 3.8  $\mu\text{m}$ 、内/外层丝阵直径分别为 8 mm/16 mm. 对比了内/外层丝根数分别为 42/21 和 21/42 时电流分配的差异. 结果表明: 驱动电流上升过程中, 内外层丝阵的电流均逐步增大, 外层丝阵电流份额逐渐减小, 而内层丝阵电流份额逐渐增大; 内层丝阵最大电流份额未超过 50%; 内/外层丝根数为 21/42 的负载外层电流较大.

**关键词:** Z 箍缩, 双层丝阵, 电流分配

**PACS:** 52.70.-m, 52.70.DS

**DOI:** 10.7498/aps.62.175203

## 1 引言

丝阵快 Z 箍缩过程能够产生高功率 X 射线辐射. 在美国 Sandia 实验室的 Z 装置上, 单层钨丝阵 Z 箍缩实验获得了峰值功率 195 TW、辐射总能量 1.8 MJ、脉宽 5.8 ns 的脉冲 X 射线辐射, 电磁能转换为 X 射线辐射能的效率达 15%<sup>[1]</sup>; 采用优化的双层钨丝阵负载, X 射线辐射功率进一步提高, 达到 280 TW, 比单层钨丝阵增加了近 40%, 辐射脉宽减小到 4 ns, 减小了约 30%<sup>[2]</sup>. 双层丝阵 Z 箍缩产生强 X 射线辐射源已成为开展惯性约束聚变研究<sup>[3,4]</sup>的一种重要技术途径.

单层丝阵 Z 箍缩过程中, 驱动电流在丝阵的每根金属丝中流过, 引起丝阵消融<sup>[5,6]</sup>, 该阶段形成了等离子体初始的空间分布和电流分布状态, 对后续的等离子体内爆过程、滞止过程产生重要影响<sup>[7]</sup>. 对单层丝阵内爆电流分布的研究有助于深入认识消融阶段细致物理过程<sup>[8,9]</sup>.

双层丝阵的几何结构与单层丝阵明显不同, 双层丝阵 Z 箍缩过程中, 驱动电流将在内外层丝阵中

进行分配, 造成内外层丝阵不同的熔解、汽化、形成等离子体以及内爆过程, 其整体内爆动力学行为相比于单层丝阵更为复杂. 深入理解双层丝阵的内爆动力学过程, 对实现双层丝阵负载的优化设计至关重要. 在 MAGPIE 装置上, 研究人员通过改变内层丝阵的电感调整负载内外层的电流分配, 观察到双层丝阵内爆动力学模式的变化<sup>[10]</sup>. Grabovskii 等在 Angara-5-1 装置上测量了双层丝阵负载的电流分布并提出了丝阵质量的优化方法<sup>[11]</sup>, 实验诊断与理论模拟相符. 丁宁等<sup>[12]</sup>建立了双层丝阵内爆的电感型模型, 对双层丝阵内爆动力学特性进行了零维模拟研究, 结果表明, 内外层丝阵电流分配改变, 导致内外层内爆轨迹呈现较大差异, 出现不同的内爆动力学模式. 负载内外层电流分配是影响双层丝阵 Z 箍缩内爆动力学过程的关键因素.

受到负载与驱动器耦合特性、丝阵内外层电阻抗特性等影响, 双层丝阵 Z 箍缩过程中的电流分配与不同驱动装置条件下等离子体实际状态密切相关. 在“强光一号”装置上, 我们对双层丝阵内爆径向关键位置点的电流进行了定量测量, 研究了负

\* 国家自然科学基金(批准号: 11135007, 11005096, 11275030)和中国博士后科学基金(批准号: 2012M511945)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: yefan1931@tom.com

载参数变化对双层丝阵电流分配的影响, 实验结果能够为理论分析双层丝阵内爆动力学模式及机理提供重要研究数据.

## 2 实验设计

“强光一号”装置实验使用两种类型双层丝阵负载, 设计参数见表 1, 两类负载 (标注为 ① 和 ②) 的高度、内外层丝阵直径和单丝直径均相同, 差别仅在于内外层丝阵的丝根数不同. 计算表明, 静态条件下, 负载 ① 外、内层电感分别为 6.5 nH 和 9.6 nH; 而负载 ② 的外、内层电感分别为 7.0 nH 和 9.2 nH. 可以定性预计, 驱动电流上升早期, 两种负载的分流均为外层大于内层, 且负载 ① 外层电流份额将超过负载 ②.

实验采用微型磁探针 [8,13] 测量电流波形, 磁探针布局如图 1 所示, 丝阵外部半径为 9.5 mm 处设置一支磁探针用于测量丝阵总电流, 内外层丝阵之间半径为 6.0 mm 轴对称位置处各设置一支磁探针, 丝阵内部半径为 2.7 mm 处设置一个磁探针测量先驱等离子体电流. 每支磁探针由两个信号极性相

反的线圈组成, 通过差分处理可消除电磁干扰的影响; 磁探针位置布局保证磁探针测量信号由全局磁场产生, 避免受到丝阵或者金属回流柱产生的局部磁场的影响. 图 2 为第 12141 发次双层丝阵 (内层 21 根丝、外层 42 根丝) 及磁探针安装完成后拍摄的照片.

## 3 测量结果

图 3 为典型发次四支微型磁探针测量结果. 电流上升早期, 每支探针的两路极性相反的信号对称性很好, 表明测量过程中噪声较小; 电流接近峰值时, 信号对称性变差, 这主要是因为磁探针受到了内爆等离子体及其产生 X 射线辐射的影响, 噪声增大甚至磁探针已被损毁.

图 4 和图 5 分别为两发次不同类型负载的实验结果: 丝阵外部磁探针 (图中标注为“外部”) 测得的电流波形, 为负载总电流; 内外层丝阵之间两支磁探针 (图中标注为“夹层 1”和“夹层 2”) 测得的电流波形, 为半径 6.0 mm 以内的电流, 包括内层丝阵中的电流以及进入该半径以内消融等离子体携

表 1 “强光一号”装置双层丝阵内爆实验负载参数

类型序号	外层丝阵			内层丝阵			高度/mm
	半径/mm	丝直径/ $\mu\text{m}$	丝根数	半径/mm	丝直径/ $\mu\text{m}$	丝根数	
①	8	3.8	42	4	3.8	21	20
②	8	3.8	21	4	3.8	42	20

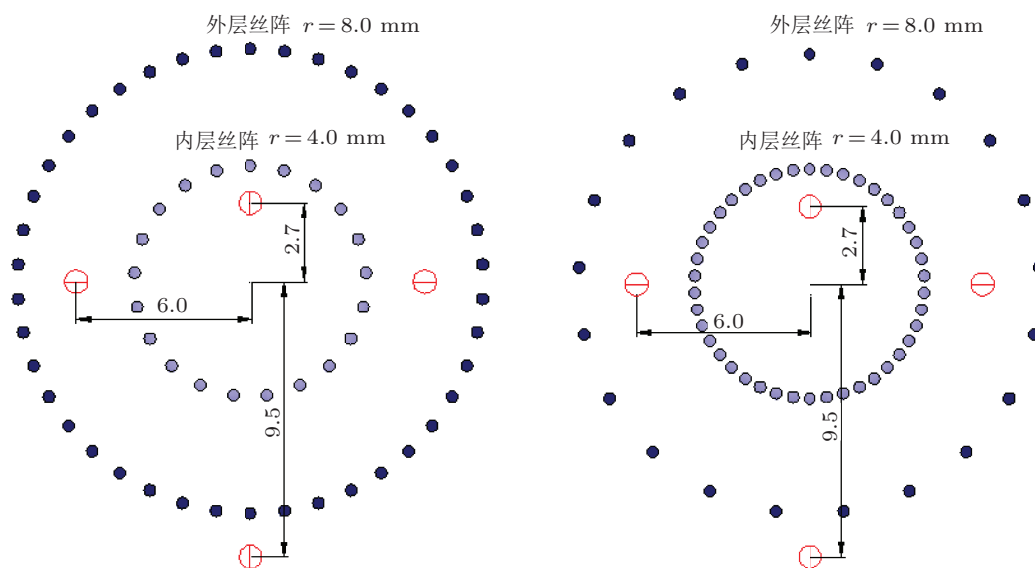


图 1 两种双层丝阵负载及磁探针布局示意图

带的电流; 丝阵内部磁探针 (图中标注为“内部”) 测得的电流波形, 为半径 2.7 mm 以内的电流, 为进入该半径以内消融等离子体携带的电流. 标注“21 所测量电流”的曲线为“强光一号”装置采用罗可夫斯基线圈在阳极板直径 450 mm 处测量的结果. 各测量信号均以 X 射线辐射功率峰值为  $t = 0$  ns 时刻, 功率波形一并画在图中. 理论上, 位于内外层丝阵之间的两支探针与中心轴线的距离相等, 其输出信号应该一致, 实际上, 图 4 所示第 12146 发次两支探针所测电流时间演化基本一致, 但图 5 给出的第 12144 发次两支探针的测量结果差别较大, 这一现象有探针装配位置偏差的影响, 还与丝阵内爆不稳定性发展导致探针与电流通道相对位置出现差异有关.

图 6 为两种不同类型负载内外层丝阵之间的磁探针测得的电流占总电流的份额及其随时间的变化关系. 蓝色粗实线为类型 ① 所有发次的平均结果, 蓝色虚线为发次之间的涨落; 红色粗实线为类型 ② 所有发次的平均结果, 红色虚线为发次之间的涨落. 统计结果表明:

1) 两种类型负载条件下, 总电流上升过程非常接近, 表明负载电感的变化未引起负载与驱动器耦合特性明显改变, 主要是因为“强光一号”驱动器的固有电感为丝阵负载电感的近十倍.

2) 在电流上升早期 ( $t = 10\%t_{I_{max}}$ ), 对于同种负

载, 电流份额内层低于外层, 这是因为两种负载均为外层电感小于内层电感; 两种负载相比, 外层 42 根丝的负载外层丝阵分流比例较高, 内层丝阵分流较低, 这是因为在丝阵半径和单丝直径相同的情况下, 丝根数增加降低了丝阵的电感, 提高了外层丝阵分流比例.



图 2 第 12141 发次双层丝阵 (内层 21 根丝、外层 42 根丝) 及磁探针照片

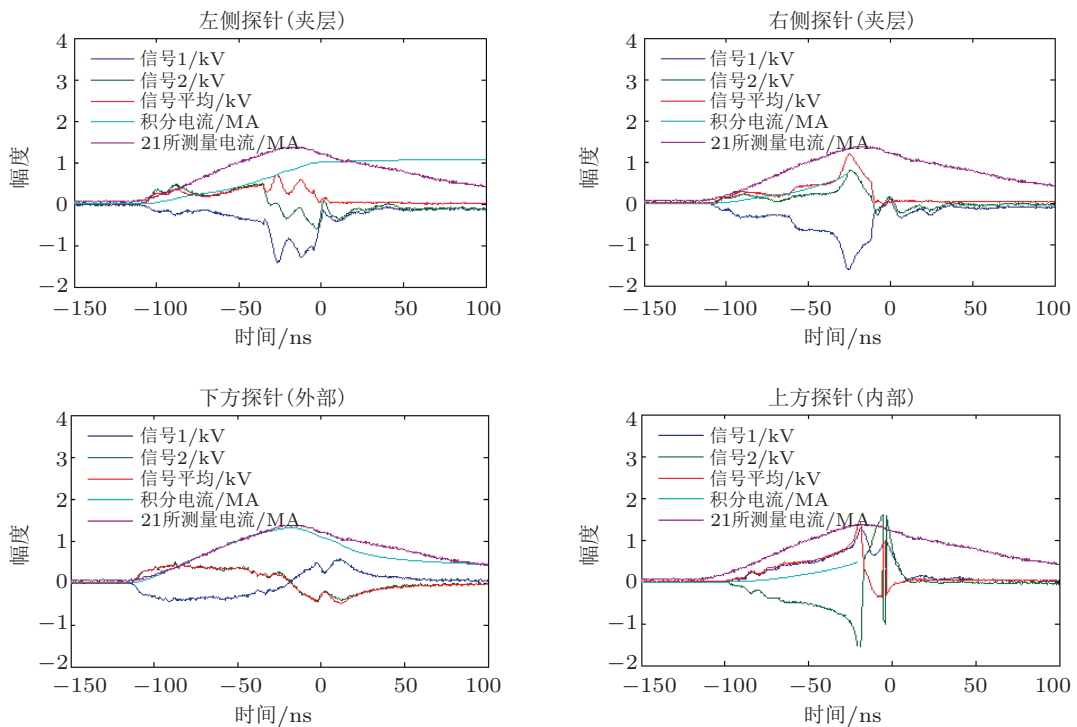


图 3 第 12146 发次 (负载类型 ①) 四支磁探针测试结果

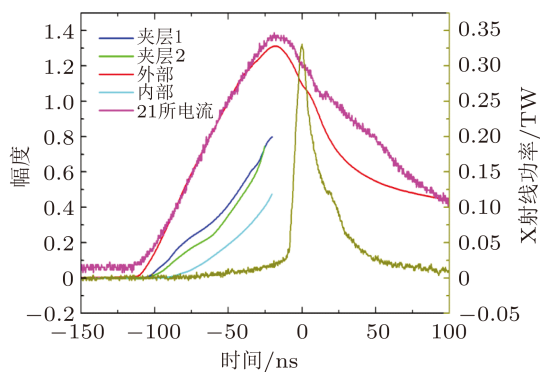


图4 类型①负载第12146发次电流波形

3) 在电流上升中期 ( $t = 50\%t_{I_{max}}$ ), 对于同种负载, 电流份额仍是内层低于外层, 但是二者的相对差异比早期有所下降, 说明内层电流份额随时间上升, 外层电流份额下降; 两种负载相比, 外层42根丝的负载外层丝阵分流比例较高, 内层丝阵分流较低.

图7为两种不同类型负载内层磁探针测得的

电流份额及其随时间的变化关系, 蓝色粗实线为类型①所有发次的平均结果, 蓝色虚线为发次之间的涨落; 红色粗实线为类型②所有发次的平均结果, 红色虚线为发次之间的涨落. 统计结果表明: 驱动电流上升至最大值以前, 两种双层丝阵负载均存在先驱等离子体电流, 其占总电流的比例不超过20%.

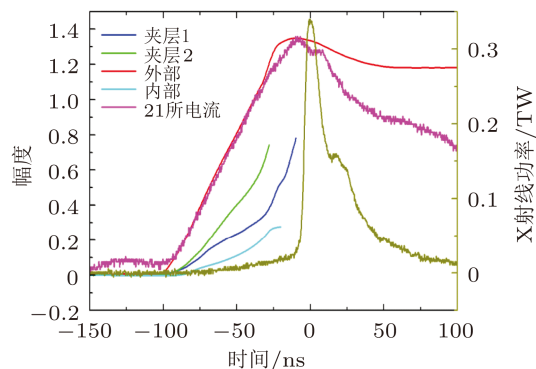


图5 类型②负载第12144发次电流波形

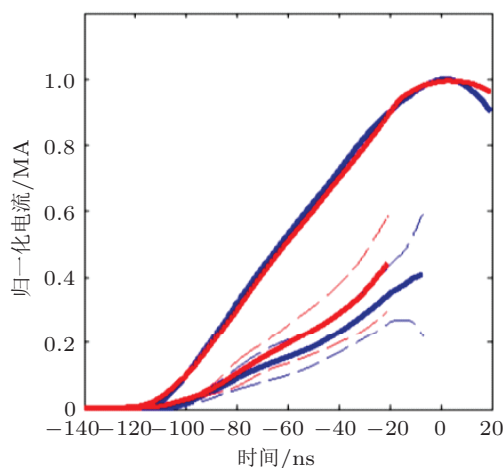


图6 内外层之间磁探针电流波形(按总电流峰值归一化)及比例, 总电流峰值时刻为  $t = 0$  ns 时刻

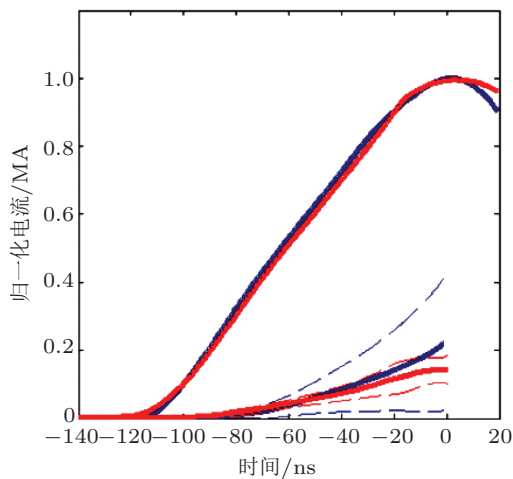
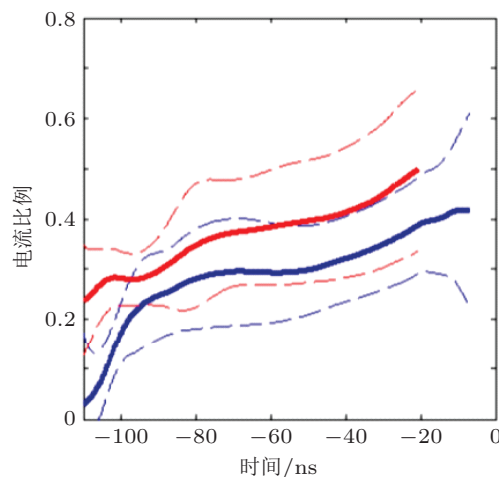
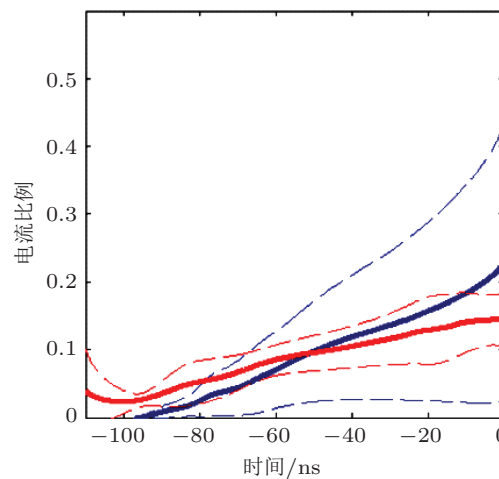


图7 内层磁探针电流波形(按总电流峰值归一化)及比例, 总电流峰值时刻为  $t = 0$  ns 时刻



## 4 结 论

利用微型磁探针系统获得了定量的双层丝阵负载电流分配及时间演化行为测量结果, 实验数据稳定可靠. 在“强光一号”装置上, 对于高度 20 mm、单丝直径为 3.8  $\mu\text{m}$ 、内/外层丝阵直径为 8 mm/16 mm 的钨丝阵, 当内/外层丝根数分别为 42/21 和 21/42 时, 外层分流比例均大于内层; 当

内/外层丝根数为 21/42 时, 外层丝阵的分流比例更高. 与 MAGPIE 和 Angara-5-1 装置上单点的电流测试相比, 实验测量能够为驱动能力较小、负载丝间隙较大的情况下对双层丝阵的电流分配特性提供更准确的描述.

感谢西北核技术研究所“强光一号”装置运行人员在实验期间给予了大力的配合和支持.

- [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, Seamen J F, Stygar W A, Struve K W, Breeze S P, McGurn J S, Torres J A, Zagar D M, Gilliland T L, Jobe D O, McKenney J L, Mock R C, Vargas M, Wagoner T, Peterson D L 1998 *Phys. Plasmas* **5** 2105
- [2] Deeney C, Douglas M R, Spielman R B, Nash T J, Peterson D L, L'Eplattenier P, Chandler G A, Seamen J F, Struve K W 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4883
- [3] Ruiz C L, Cooper G W, Slutz S A, Bailey J E, Chandler G A, Nash T J, Mehlhorn T A, Leeper R J, Fehl D, Nelson A J, Franklin J, Ziegler L 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 015001
- [4] Cuneo M E, Vesey R A, Bennett G R, Sinars D B, Stygar W A, Waisman E M, Porter J L, Rambo P K, Smith I C, Lebedev S V, Chittenden J P, Bliss D E, Nash T J, Chandler G A, Afeyan B B, Yu E P, Campbell R B, Adams R G, Hanson D L, Mehlhorn T A, Matzen M K 2006 *Plasma Phys. Control. Fusion* **48** R1
- [5] Sarkisov G S, Rosenthal S E, Struve K W, Cowan T E, Presura R, As-tanovitskiy A L, Haboub A, Morozov A 2007 *Phys. Plasma* **14** 112701
- [6] Huang J, Sun S K, Xiao D L, Ding N, Ning C, Zhang Y, Xue C 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6351 (in Chinese) [黄俊, 孙顺凯, 肖德龙, 丁宁, 宁成, 张扬, 薛创 2010 物理学报 **59** 6351]
- [7] Lemke R W, Sinars D B, Waisman E M, Cuneo M E, Yu E P, Hail T A, Hanshaw H L, Brunner T A, Jennings C A, Stygar W A, Desjarlais M P, Mehlhorn T A, Porter J L 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 025005
- [8] Zhou L, Xue F B, Si F N, Yang J L, Ye F, Xu R K, Hu Q Y, Fu Y C, Jiang S Q, Li L B, Chen J C, Xu Z P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 195207 (in Chinese) [周林, 薛飞彪, 司粉妮, 杨建伦, 叶凡, 徐荣昆, 胡青元, 甫跃成, 蒋树庆, 李林波, 陈进川, 徐泽平 2012 物理学报 **61** 195207]
- [9] Huang J, Ding N, Ning C, Sun S K, Zhang Y, Xiao D L, Xue C 2012 *Phys. Plasmas* **19** 062701
- [10] Lebedev S V, Aliaga-Rossel R, Bland S N, Chittenden J P, Dangor A E, Haines M G, Zakauallah M 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1708
- [11] Grabovskii E V, Zulkakishvili G G, Mitrofanov K N, Oleonenik G M, Frolov I N, Sasorov P V 2006 *Plasma Phys. Rep.* **32** 32
- [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] Xue F B, Yang J L, Xu R K 2010 *High Power Laser and Particle Beams* **22** 2055 (in Chinese) [薛飞彪, 杨建伦, 徐荣昆 2010 强激与粒子束 **22** 2055]

# Experimental study on current division of nested wire array Z pinches\*

Ye Fan<sup>†</sup> Xue Fei-Biao Chu Yan-Yun Si Fen-Ni Hu Qing-Yuan Ning Jia-Min  
Zhou Lin Yang Jian-Lun Xu Rong-Kun Li Zheng-Hong Xu Ze-Ping

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

(Received 22 January 2013; revised manuscript received 30 April 2013)

## Abstract

The current division between the inner and the outer arrays is one of the key factors that impact the implosion dynamics and modes of nested wire array. This paper presents the first quantitative measurements of current division for nested wire array Z pinch on the Qiang Guang-I pulsed power facility. In experiments, the nested wire arrays, made of 3.8  $\mu\text{m}$ -diameter tungsten wires, were 20 mm in height and 8 mm/16 mm in diameter for inner/outer array. Measurements for loads consisting of 42/21 wires in inner/outer array were compared with that of 21/42 in inner/outer array. Data of current versus time at various radial positions were obtained using magnetic probes until 20 ns before the current peak. Results show that the currents in inner and outer arrays increase during the rise of the driving current, the proportion of current in outer array decreases and that in inner array increases, while the current in outer array, for loads with 21/42 wires in inner/outer array, was larger than those with 42/21 wires in inner/outer array.

**Keywords:** Z pinch, nested wire array, current division

**PACS:** 52.70.-m, 52.70.DS

**DOI:** 10.7498/aps.62.175203

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11135007, 11005096, 11275030), the National Postdoctoral Science Foundation of China (Grant No. 2012M511945).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: yefan1931@tom.com