

## 中俄 Z-pinch 联合实验新进展\*

徐荣昆<sup>1)</sup> 李正宏<sup>1)</sup> 杨建伦<sup>1)</sup> 丁宁<sup>2)</sup> 周秀文<sup>3)</sup> 蒋世伦<sup>1)</sup> 章法强<sup>1)</sup> 王真<sup>1)†</sup> 许泽平<sup>1)</sup>  
 宁家敏<sup>1)</sup> 李林波<sup>1)</sup> E. V. Grabovsky<sup>4)</sup> G. M. Oleynic<sup>4)</sup> V. V. Alexandrov<sup>4)</sup> V. P. Smirnov<sup>4)</sup>

1) (核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

2) (北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

3) (中国工程物理研究院激光与聚变研究中心, 绵阳 621900)

4) (Troitsk Institute for Innovation and Thermonuclear Researches, Troitsk 142190, Russia)

(2009年11月20日收到; 2010年6月17日收到修改稿)

在 Angara-5-1 装置 Z-pinch 实验中, 研究了双层丝阵内爆动力学模式和动态黑腔, 获得高产额 X 射线辐射能量和功率, X 射线辐射功率达 5.6 TW, 泡沫 X 射线辐射温度达 63 eV, 本文给出主要实验设计方法和结果.

**关键词:** Z 箍缩, 双层丝阵, X 射线辐射, 动态黑腔

**PACS:** 52.58.Lq, 52.59.Qy, 47.65.Md

## 1. 引言

Z-pinch<sup>[1]</sup>驱动的惯性约束聚变(ICF)大致分为磁场驱动丝阵内爆、高速内爆等离子体将其能量转化为黑腔 X 射线辐射能、高温黑腔辐射驱动有一定构型的 DD/DT 靶内爆, 最终实现聚变等过程, 前一个过程为后一个过程提供条件, 后一个过程是前一个过程的结果, 其中丝阵参数优化、高效黑腔设计是实现 ICF 的基础. 十五期间, 中国工程物理研究院在国家重点自然科学基金等资助下利用国内外脉冲功率装置开展了 Z-pinch 研究, 进行了丝阵负载、喷气负载、动态黑腔、以及聚氘丝负载和丝阵轴心内填聚氘丝负载实验, 重点开展了 Z-pinch 基本物理特性探索. 2008 年, 第三次中俄 Z-pinch 联合实验在俄罗斯创新与聚变研究所 Angara-5-1 装置<sup>[2]</sup>和库尔恰托夫研究所 C300 装置进行, 主要内容是双层丝阵内爆模式和丝阵中心填充低密度泡沫的动态黑腔实验, 本次较大规模的联合实验采用了 X 射线辐射参数、时空分辨 X 射线辐射条纹像<sup>[3]</sup>、分幅像<sup>[4]</sup>、X 射线能谱等测量设备, 各种时空分辨测量结果进一步演示了 3—4 MA 负载电流的 Z-Pinch 物理特性, 虽然在创造研究记录方面有所局限, 但对双

层丝阵内爆机理进行了积极的探索, 成功进行了动态黑腔设计, 取得一批新的成果.

## 2. 主要结果及分析

## 2.1. 双层丝阵内爆动力学模式

到目前为止普遍认为双层丝阵负载在抑制不稳定性增长、提高 X 射线辐射功率方面最为有效. Z 装置上采用双层钨丝阵获得的 X 射线功率达 280 TW<sup>[5]</sup>, 脉宽 4 ns, 并成为黑腔设计首选的丝阵构形. 然而双层丝阵内爆机理还有待深入研究, 2000 年 MAGPIE 装置上的实验最早证实并提出, 双层丝阵有两种动力学模式: 流体动力学(壳-壳)碰撞模式和电流转换(内层渗透)模式, 而在低电流装置上的双层丝阵内爆动力学可能存在更多模式<sup>[6]</sup>, 因此, 在较小驱动电流装置上开展双层丝阵内爆模式和抑制不稳定性内爆机理实验, 有助于揭示 Z-pinch 基本物理特性.

2008 年我们利用 Angara-5-1 装置进行了双层丝阵(图 1)实验, 此前(2006 年)的实验中, 已经对单层丝阵负载参数进行了优化设计, 丝阵参数为 W 丝数量 90, 丝阵高度 15 mm, 丝阵直径 12 mm, 单丝

\* 国家自然科学基金(批准号: 10035030, 10635050)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wangzhen@tsinghua.org.cn

直径  $5\ \mu\text{m}$  的最高 X 射线辐射功率达到  $5.0\ \text{TW}$ , X 射线辐射转换效率大于  $15\%$ , 我们将  $90$  根钨丝按  $1:2$  比例拆分为内层  $30$  根 (直径  $6\ \text{mm}$ ) 外  $60$  根 (直径  $12\ \text{mm}$ ) 设计了双层丝阵, 实验观察到 X 射线功率波形有两个峰 (图 2,  $P_2$ ), X 射线辐射条纹像也有两个明显的间隔  $10\ \text{ns}$  以上的发光区, X 射线分幅图像显示了双层丝阵内外层内爆分离而不同时聚心内爆, 处理内层丝阵发光边界随时间向内移动轨迹获得的最大运动速度约  $2.3 \times 10^7\ \text{cm/s}$ . 对此, 考虑内外层丝阵初始电感以及箍缩开始后电感的变化对内外层丝阵电流分配的影响, 我们将双层并联电路方程与内外层丝阵运动方程耦合, 编制了模拟分析程序对内外层丝阵内爆过程进行了模拟计算<sup>[6]</sup>, 计算表明, 当内层电感相对外层比较低的情况下, 电流较早的通过内层, 使其早于外层先内爆到心并辐射 X 射线, 所以, 双层丝阵内爆 X 射线辐射出现双峰的原因之一是, 内层有足够大的电流, 驱使其早于外层丝阵先箍缩到心.

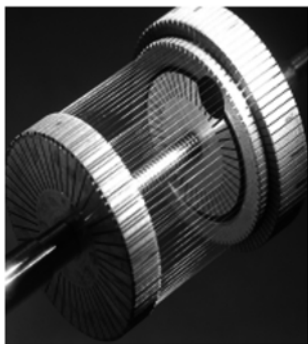


图 1 第三次中俄实验用双层丝阵负载

2008 年第三轮中俄 Z-pinch 联合实验中, 在保持双层丝阵负载质量与优化的单层丝阵负载质量一致基础上, 以内外层同时聚心内爆为目标, 将 OD 模拟分析程序运用于双层丝阵设计, 设计了两种参数的双层丝阵: 其一是钨丝直径  $4.2\ \mu\text{m}$ , 内层  $43$  根, 外层  $86$  根, 内外丝阵半径分别  $4.5\ \text{mm}$  和  $9.0\ \text{mm}$ ; 其二是钨丝直径  $4.2\ \mu\text{m}$ , 丝数量  $129$ , 内层  $43$ , 外层  $86$ , 内外半径分别  $6.0\ \text{mm}$  和  $10\ \text{mm}$ . 在实验测量上, 采用安置在丝阵内外层中间的  $300\ \mu\text{m}$  罗柯夫斯基微型磁场探针测量了内层丝阵电流.

图 2 中  $P_1$  是典型的双层丝阵 X 射线辐射波形, 其波形为单一峰值结构,  $P_1$  显示 X 射线辐射功率峰值高于 2006 年双层丝阵 X 射线辐射功率 ( $P_2$  曲线峰值), 表明改进后的双层丝阵负载内外层同

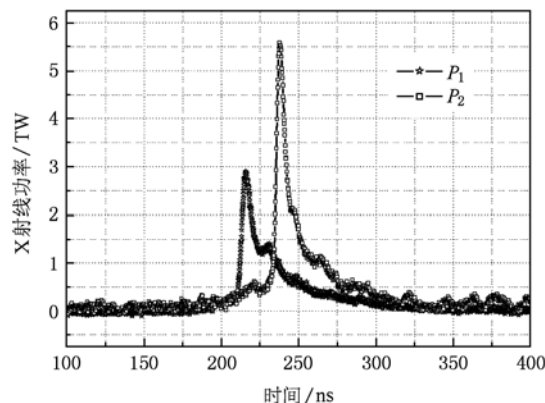


图 2 双层丝阵 X 射线辐射特性  $P_1$ : 4668 发次, X 射线功率  $5.6\ \text{TW}$ , FWHM  $7.2\ \text{ns}$ , 能量  $106\ \text{kJ}$ ;  $P_2$ : 4074 发次, X 射线功率  $2.9\ \text{TW}$ , FWHM  $7.4\ \text{ns}$ , 能量  $54\ \text{kJ}$

时聚心内爆, X 射线辐射功率增加, 最高值达到  $5.6\ \text{TW}$ , 为 Angara-5-1 装置的最高水平, 通过对负载电流和电压波形的分析计算, 加载到负载上的电能转换 X 射线辐射能的效率超过了  $50\%$ , 对等离子体 X 射线辐射图像分析计算给出了  $\sim 35\%$  辐射能量来自半径  $1\text{—}1.5\ \text{mm}$  箍缩较紧密区以外的区域, 表明等离子体内爆停滞阶段仍有部分等离子体质量未参与聚心内爆.

微型磁场探针测量 (图 3) 显示, 内爆早期丝阵外层和内层流过的电流差异显著, 外层丝阵电流加载时间早, 内层丝阵电流加载时间晚, 内层电流滞后  $20\text{—}30\ \text{ns}$ , 内爆早期大部分电流从外层丝阵流过. 该结果支持 X 射线分幅相机记录的双层丝阵内爆图像, 如图 4 所示, 内爆早期外层丝阵发光区为“芯晕”结构, 外层等离子体内爆时, 不稳定性发展导致 X 射线辐射空间均匀性差, 但在内爆早期, 内层发光区因驱动电流小而保持了较好空间形态, 内层不稳定性发展时间晚、增长速度缓慢, 外层与内层同步内爆后, 内层相对均匀等离子体的分布将有效改善等离子体时空分布的均匀性, 从而增加轴向等离子体内爆同步性. 进一步的双层丝阵实验还确认, 将双层丝阵内外层丝数量交换后, 负载 X 射线辐射功率和产额无显著变化, 但外层丝数量少、内层丝数量多的双层丝阵构形, 减小了负载总电流上升时间, 有利于减小不稳定性发展时间.

## 2.2. 动态黑腔实验

动态黑腔<sup>[7]</sup>是迄今认为能够获得最高辐射温度的黑腔设计, 无论是美国 Sandia 实验室, 还是北

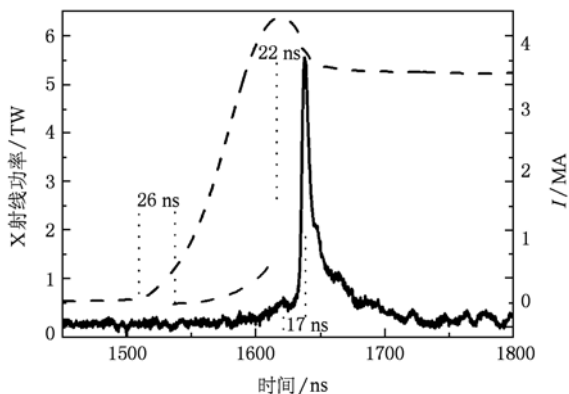


图3 4668 发次,总电流波形(黑色虚线)、X 射线辐射功率(黑实线)和磁探针测量的内层丝阵电流(仅出现在 1540—1610 ns 之间的浅灰色虚线)

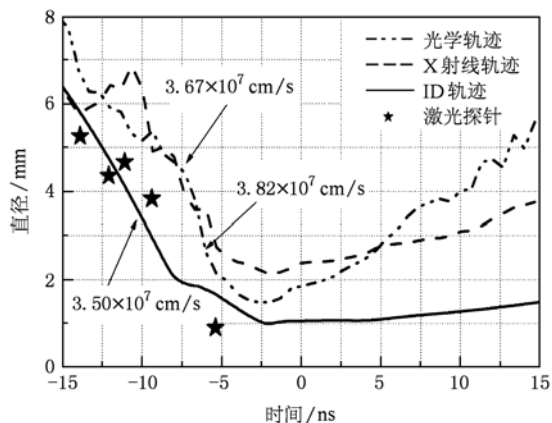


图6 4431 发次,实验与数值模拟内爆轨迹,分别列出了可见光波段条纹像、一维 X 射线波段条纹像、激光探针测量结果和一维理论数值模拟结果

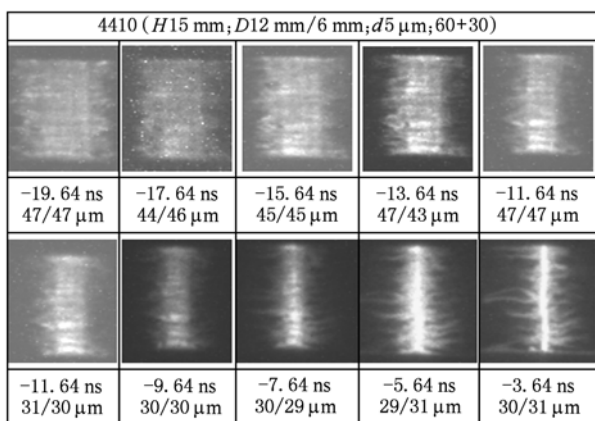


图4 4410 发次,双层丝阵内爆辐射图像,早期内爆过程外层等离子体发区分布呈现芯晕结构,但内层丝阵保持了完整的结构

京应用物理与计算数学研究所的模拟计算均表明,驱动器电流达到 30—40 MA 时,采用动态黑腔加热 Z-pinch 的 DT 靶最终释放的聚变能量能够大于初始加入能量,因此动态黑腔在 Z-pinch 驱动的 ICF 研究中具有重要应用前景.

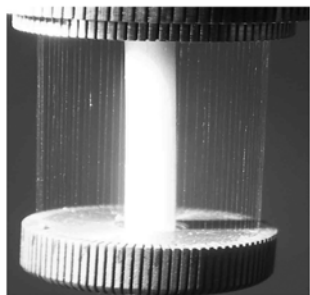


图5 动态黑腔负载

2008 年中俄 Z-pinch 联合实验设计的动态黑腔由单层钨丝阵中心放置低密度泡沫  $C_{17}H_{20}O_6$  构成(图 5),实验采用了两种参数的丝阵:一种是 90 根、钨丝直径  $5 \mu m$ ,丝阵直径 12 mm;另一种是 129 根、钨丝直径  $4.2 \mu m$ ,丝阵直径 18 mm. 此前(2006 年)进行实验已经表明,用几种“主动”与“被动”测量系统联合测试获得的第一种丝阵内爆最大速度评估值为  $3 \times 10^7 - 4 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ,而等离子体内爆获得最大速度对应静态丝阵直径  $1/3 - 1/4$  的位置,提前 X 射线辐射峰时间 4—8 ns<sup>[8]</sup>,按照图 6,为获得最大的丝阵内爆动能,实验中泡沫直径选择范围确定为 3—5 mm. 第二种丝阵在保证丝阵总质量不变前提下,加大了丝阵直径,同时减小相邻丝间距,增加了丝数量,以期加大丝阵内爆距离,提高内爆动能.

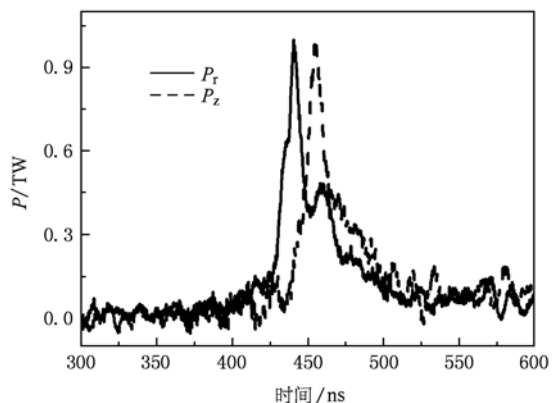


图7 4660 发次,钨丝阵填充泡沫负载的径向 X 射线辐射特性,钨丝直径  $4.2 \mu m$ ,数量 129,内层 43,外层 86,内外丝阵半径分别 4.5 和 9.0 mm;泡沫密度  $10 \text{ mg/cm}^3$ ,直径 2.7 mm

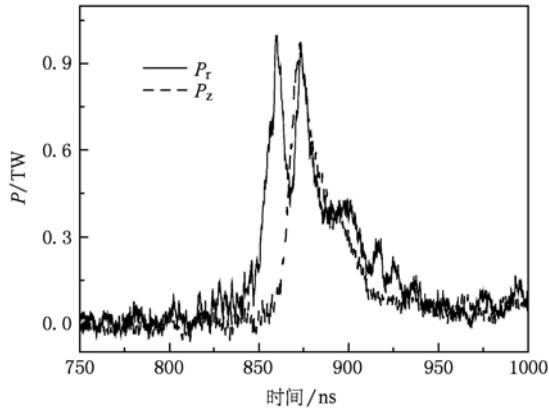


图8 4654 发次,钨丝阵填充泡沫负载的径向 X 射线辐射特性,钨丝直径 5.0  $\mu\text{m}$ ,丝数量 90,内层 30,外层 60,内外丝阵半径分别 3 和 6 mm;泡沫密度 10  $\text{mg}/\text{cm}^3$ ,直径 2.7 mm

实验获得的 X 射线辐射特性如图 7 和图 8,反映等离子体与泡沫碰撞作用发光的径向 X 波形呈多峰结构,泡沫 X 射线辐射波形峰值(对应于温度最高点时间)滞后于径向 X 射线辐射第一个波形峰值(对应于丝阵内爆等离子体与泡沫外表面碰撞时刻). X 射线辐射分幅图像和 X 射线辐射条纹像均显示了从丝阵内爆边界开始运动、丝阵内爆聚心压缩、泡沫外表面运动、和最终飞散的全过程图像,用分幅像发光半径随时间变化获得  $3.4 \times 10^7$ — $3.8 \times 10^7$   $\text{cm}/\text{s}$  的运动速度,其中“128 W/4.2  $\mu\text{m}$ /丝阵 18 mm”丝阵内爆速度略高于“90 W/5.0  $\mu\text{m}$ /丝阵 12 mm”,但前者不稳定性波长和振幅高于后者,即

前者丝阵内爆等离子体发光图像空间均匀性低于后者. 泡沫 X 射线辐射总强度随时间变化的数据由轴向测试角为  $7^\circ$  的坪 X 射线能量响应探测器获得,设置在阳极的测试孔为 2 mm,按  $(\sigma T^4)$  黑体辐射计算,不考虑测试空缩孔效应,实验获得最高泡沫 X 射线辐射温度 63 eV,两种参数丝阵中心填充的低密度泡沫辐射温度六发平均达到 60.0 eV(精度好于 5%).

图 9 和图 10 中的左图是由 X 射线辐射分幅图像测量结果,右图给出了丝阵内爆等离子体发光轨迹、径向 X 射线辐射(即钨等离子体与泡沫碰撞作用发光)、轴向 X 射线辐射(即泡沫 X 射线辐射)和负载电流测量结果. 图 9,图 10 显示等离子体与泡沫发生碰撞持续时间达近 20 ns 的过程,对分幅图像亮度径向积分处理表明:在碰撞发光标记 5 位置,等离子体获得最大内爆速度时,但 X 射线分幅图像尺度为 5 mm,大于泡沫外径 2.7 mm,此时,大部分钨等离子体未与泡沫发生碰撞,泡沫 X 射线辐射波形缓慢上升;在钨等离子体碰撞发光第一个 X 射线辐射峰位(标记 7)位置,泡沫 X 射线波形出现“起跳”,波形前沿快速上升,但此时分幅图像亮度 1/4 和 1/8 底宽分别为 6 和 8 mm,仍然有部分钨等离子体还未与泡沫发生碰撞;此后(标记 8 后),此前未与泡沫碰撞的钨等离子体逐渐参与碰撞,使 X 射线辐射温度逐渐升高直至 X 射线辐射温度达到最大;等离子体发光图向逐渐膨胀(标记 10)后,泡沫 X 射线辐射温度下降.

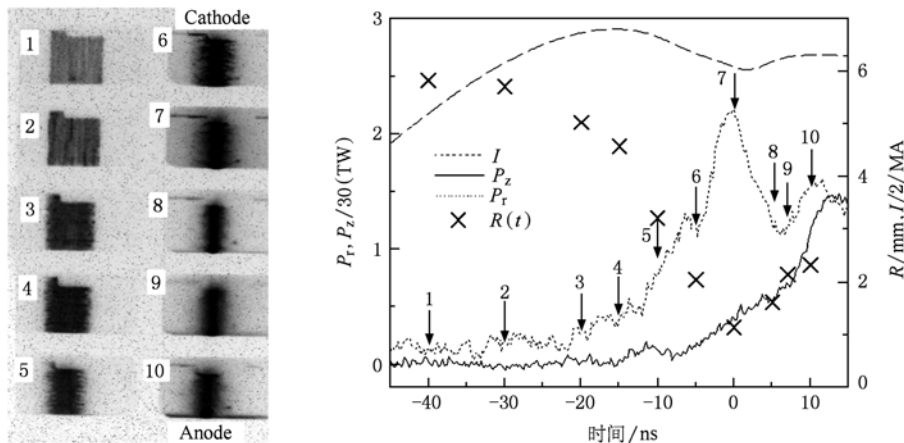


图9 4661 发次,左图 X 射线分幅辐射图像;右图轴向、径向 X 射线辐射波形和电流 I 波形. 图中“x”是由分幅像获得的 X 射线辐射半径. 负载:128 W/4.2  $\mu\text{m}$ /丝阵 18 mm,填充 2.7 mm 泡沫,密度 10  $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-3}$

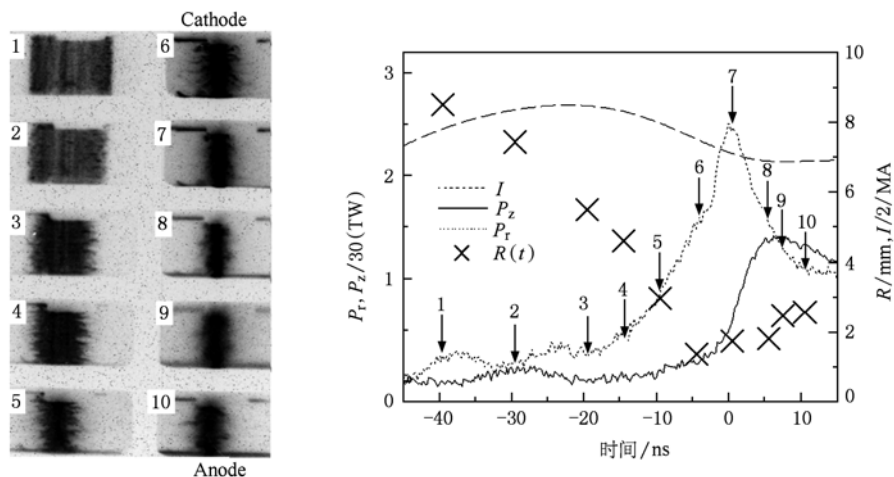


图10 4655 发次,左图 X 射线分幅辐射图像;右图轴向、径向 X 射线辐射波形和电流 I 波形. 图中“x”是由分幅像获得的 X 射线辐射半径. 负载:90 W/5.0  $\mu\text{m}$ /丝阵 12 mm + 填充泡沫 2.7 mm, 密度  $10 \text{ mg}\cdot\text{cm}^{-3}$

### 3. 结 论

1. 双层丝阵内爆获得单峰 X 射线辐射波形,内层与外层等离子体同时聚心,提高了 X 射线辐射功率,最高 X 射线辐射功率为 5.6 TW.

2. 双层丝阵内爆早期电流从外层流过,内层丝阵电流加载时间晚 20—30 ns,内爆早期,外层丝阵等离子体发光分布呈芯晕结构,但内层丝阵保持了相对完整位形,内外层等离子体同时内爆有利于改善内爆等离子体空间均匀性.

3. 最高泡沫 X 射线辐射温度 63 eV,由 4.2  $\mu\text{m}$

钨丝构建的 18 mm 丝阵内爆速度 ( $3.8 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ) 大于 5.0  $\mu\text{m}$  钨丝组建的 12 mm 丝阵内爆速度 ( $3.4 \times 10^7 \text{ cm/s}$ ),但前者不稳定性波长、振幅大于后者.

4. 径向 X 射线辐射大部分来自于丝阵与泡沫碰撞发光,泡沫内部 X 射线“起跳”于丝阵与等离子体碰撞时刻,径向 X 射线辐射最大值对应于泡沫内部 X 射线辐射波形快速上升阶段,随着丝阵内爆等离子体逐渐聚心,泡沫 X 射线辐射达到最大.

Angara-5 和强光一号装置全体运行人员为实验的顺利进行提供了保障,在此表示感谢.

[1] Sanford T W L, Allshouse G O, Marder B M, Nash T J, Mock R C, Spielman R B, Seamen J F, McGurn J S, Jobe D, Gilliland T L, Vargas M 1996 *Phys. Rev. Lett.* **77** 5063

[2] Lebedev S V, Beg F N, Bland S N, Chittenden J P, Dangor A E, Haines M G, Pikuz S A, Shelkovenko T A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 98

[3] Xu R K, Li Z H, Guo C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1203 (in Chinese) [徐荣昆、李正宏、郭存 2004 物理学报 **53** 1203]

[4] Zhang F Q, Li Z H, Xu Z P, Xu R K, Yang J L, Cuo C, Xia G X, Chen J C, Song F J, Ning J M, Wang Z, Xue F B, Li L B, Qin Y 2006 *Chin. Phys.* **15** 2058

[5] Deeney C, Douglas M R, Spielman R B, Nash T J, Peterson D L, Eplattienier P L, Chandler G A, Seamen J F, Struve K W 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4883

[6] Ding N, Zhang Y, Liu Q, Xiao D L, Su 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]

[7] Vesey R A, Cuneo M E, Porter J L 2003 *Phys. Plasmas* **10** 1854

[8] Wang Z, Xu R K, Yang J L, Hua X S, Li L B, Xu Z P, Ning J M, Song F J 2007 *Chin. Phys.* **16** 772

## New results of Sino-Russian joint Z-pinch experiments \*

Xu Rong-Kun<sup>1)</sup> Li Zheng-Hong<sup>1)</sup> Yang Jian-Lun<sup>1)</sup> Ding Ning<sup>2)</sup> Zhou Xiu-Wen<sup>3)</sup> Jiang Shi-Lun<sup>1)</sup>  
Zhang Fa-Qiang<sup>1)</sup> Wang Zhen<sup>1)†</sup> Xu Ze-Ping<sup>1)</sup> Ning Jia-Min<sup>1)</sup> Li Lin-Bo<sup>1)</sup>  
E. V. Grabovsky<sup>4)</sup> G. M. Oleynic<sup>4)</sup> V. V. Alexandrov<sup>4)</sup> V. P. Smirnov<sup>4)</sup>

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

2) (*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

3) (*Research Center of Laser Fusion of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

4) (*Troitsk Institute for Innovation and Thermonuclear Reseraches, Troitsk 142190, Russia*)

(Received 20 November 2009; revised manuscript received 17 June 2010)

### Abstract

Dynamics of double tungsten-wire array and dynamic hohlraum are investigated on the Angara-5 facility. X-ray power and hohlraum temperature are obtained to be as high as 5.6 TW and 63 eV respectively. Main experimental results together with the design idea are also given in this paper.

**Keywords:** Z-pinch, double wire array, X-ray radiation, dynamic hohlraum

**PACS:** 52.58.Lq, 52.59.Qy, 47.65.Md

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10035030, 10635050).

† Corresponding author. E-mail: wangzhen@tsinghua.org.cn