

Z箍缩动态黑腔冲击波辐射图像诊断

蒙世坚 黄展常 甯家敏 胡青元 叶繁 秦义 许泽平 徐荣昆

Shock X-ray emission image measurement in Z-pinch dynamic hohlraum

Meng Shi-Jian Huang Zhan-Chang Ning Jia-Min Hu Qing-Yuan Ye Fan Qin Yi Xu Ze-Ping Xu Rong-Kun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 075201 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.075201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.075201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Z箍缩动态黑腔形成过程和关键影响因素数值模拟研究

Numerical studies on the formation process of Z-pinch dynamic hohlraums and key issues of optimizing dynamic hohlraum radiation

物理学报.2015, 64(23): 235203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.235203>

Xe 介质极紫外光源时间特性及最佳条件研究

Time behavior and optimum conditions for the Xe gas extreme ultraviolet source

物理学报.2013, 62(24): 245204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.245204>

Z箍缩动态黑腔动力学及辐射特性初步实验研究

Preliminary experimental study on implosion dynamics and radiation character of Z-pinch dynamic hohlraum

物理学报.2013, 62(15): 155203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.155203>

同轴圆柱形磁绝缘传输线前沿损失与工作电压关系

Pulse loss front in coaxial cylinder vacuum magnetically insulated transmission lines under different voltages

物理学报.2012, 61(24): 245203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.245203>

擎抗庖缓艘锥形丝阵内爆特性研究

Implosion characteristics of conical wirearray Z pinches on "Qiangguang1" facility

物理学报.2012, 61(19): 195205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.195205>

Z箍缩动态黑腔冲击波辐射图像诊断*

蒙世坚[†] 黄展常 甯家敏 胡青元 叶繁 秦义 许泽平 徐荣昆

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2015年12月8日收到; 2016年1月12日收到修改稿)

在“聚龙一号”装置上开展了单层钨丝阵加载重泡沫的动态黑腔实验, 初步研究了Z箍缩动态黑腔中冲击波传播和黑腔形成的物理过程. 获得了冲击波辐射环的演化图像, 分析了丝阵等离子体与泡沫的作用过程及动态黑腔内的辐射特性. 测得冲击波的向心传播速度为 (14.2 ± 1.7) cm/ μ s, 冲击波平均宽度为 0.8—0.9 mm. 冲击波辐射环的发光强度沿角向分布的标准偏差约为 $\pm 10\%$, 中心黑腔区的标准偏差约为 $\pm 4.2\%$.

关键词: Z箍缩, 动态黑腔, 冲击波辐射, 分幅相机

PACS: 52.58.Lq, 52.59.Qy, 52.70.La

DOI: 10.7498/aps.65.075201

1 引言

Z箍缩动态黑腔压缩靶丸内爆因其理论上能以较高的效率将驱动器存储的电磁能耦合至聚变靶丸, 而被选作Z箍缩间接驱动惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 的主要技术途径之一^[1,2]. 动态黑腔形成的物理过程、基本特性和变化规律, 是Z箍缩驱动ICF研究的关键物理问题之一. 动态黑腔利用高速内爆的丝阵等离子体主体与轴心处低密度泡沫转换体碰撞, 丝阵等离子体的动能转换为热能, 一方面在泡沫转换体表层附近形成高温高密度等离子体薄层, 另一方面碰撞过程还在泡沫转换体区激起向轴心传播的强冲击波. 冲击波在传播过程中, 波阵面上的物质被快速热化, 电子温度升高引起的强辐射向冲击波以外的区域输运, 强辐射以快于冲击波波阵面的速度向轴心传播, 泡沫周围的高原子序数等离子体作为黑腔壁束缚向外输运的辐射, 从而在冲击波波阵面以内形成物质宏观结构未受显著扰动而辐射温度较高的区域, 即有效可用的黑腔区域. 随着冲击波波阵面向轴心传播, 有效可用的黑腔区域逐渐变小, 黑腔辐射温度

逐渐增加. 也就是说, 丝阵等离子体与泡沫转换体碰撞形成的冲击波是加热动态黑腔的主要能量来源. 冲击波的形成与丝阵等离子体密度分布、内爆动力学行为、泡沫参数等密切相关, 而其自身的状态将决定黑腔的温度、空间均匀性等重要特性, 因此, 对冲击波形成及传播过程的研究成为研究动态黑腔的基础.

美国圣地亚国家实验室是Z箍缩动态黑腔研究的先驱, 其采用双层钨丝阵加载直径 6 mm、高 12 mm 的泡沫获得峰值温度超过 200 eV 的黑腔^[3]. 拍摄了冲击波向心传播及靶丸内爆过程的辐射演化图像, 多发次统计得 14 mg/cm³ 的泡沫中冲击波的传播速度为 32.5 cm/ μ m $\pm 1\%$ ^[4,5]. 通过在泡沫靠近两端的区域掺杂 Mg 和 Al 元素, 测量掺杂元素的时间分辨能谱, 验证了动态黑腔内部上下两端的辐射场是一致的^[6]. 在泡沫中部掺杂 Si 元素, 由其辐射能谱推断得冲击波向心传播的约 5 ns 间隔内冲击波的密度及电子温度的变化, 冲击产生的辐射向黑腔输运的能量大于 180 kJ^[7]. 在泡沫中心放置球形 DD 聚变靶丸, 获得中子产额为约 10^{11} 个中子每发次^[8]. 圣地亚实验室还建立了较为完善的模拟程序^[8], 可整体模拟双层丝阵的内爆、与泡沫的

* 国家自然科学基金 (批准号: 11135007, 11305154) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: mengsj04@163.com

碰撞、冲击波的传播、辐射驱动聚变靶丸的内爆以及电极对辐射的吸收, 模拟预测的很多特征量与实验符合得很好, 例如模拟的中子产额在实验值的2倍范围内. 相对于美国已经较系统地研究了动态黑腔及其驱动靶丸的物理特性, 国内受装置驱动电流限制, 前期主要进行等离子体与泡沫相互作用过程的研究^[9,10], 对黑腔形成过程和内部特性的认识局限于理论模拟研究^[11,12]. 本文在“聚龙一号”装置(峰值电流为7—8 MA, 10%—90%上升时间为60—70 ns^[13])上开展了单层钨丝阵加载重泡沫的动态黑腔实验, 对冲击波传播物理图像和黑腔的形成进行初步研究. 采用时间分辨针孔分幅相机在轴向0°方向诊断, 在国内首次获得了冲击波辐射环的演化图像, 分析了冲击辐射环传播速度及其角向均匀性.

2 实验描述

动态黑腔实验负载由“聚龙一号”装置峰值7—8 MA, 前沿60—70 ns的电流驱动. 其参数如下: 单丝直径7 μm 的168根钨丝均匀布置成直径20 mm的柱面丝阵, 丝阵高度为15 mm, 丝阵中心放置直径6 mm、密度16 mg/cm^3 的均匀泡沫柱($\text{C}_{15}\text{H}_{20}\text{O}_6$), 泡沫柱高度略小于丝阵高度, 钨丝阵与泡沫的质量比为0.29. 此泡沫质量并非获得高温黑腔的优化值, 而是为了延长冲击波传播时间以便更细致地研究动态黑腔的物理过程, 特意将泡沫质量提高. 实验布局如图1所示, 直径5 mm轴向诊断孔紧贴泡沫柱上端面, 轴向主要的诊断系统是位于泡沫柱轴向0°方向的X射线针孔分幅相机, 和离轴8°方向上的闪烁体X光功率仪及X光条纹相机, 这些系统通过诊断孔进而诊断动态黑腔内部的状态演化过程. 另外在丝阵径向布置了两套闪烁体X光功率仪, 获取径向X光辐射功率随时间变化的波形. X射线针孔分幅相机用于诊断冲击波自发辐射的图像, 针孔为直径100 μm 、厚度20 μm 的钽膜, 针孔到负载的距离为2 m, 像物比为1:1, 具有10分幅, 每幅开门时间半高全宽约1 ns, 幅间开门时间间隔约2.5 ns. 通过微通道光电倍增管(micro-channel plate photo-multiplier tube)测量窄同步激光信号, 将各个诊断系统的时间与径向X光辐射功率波形进行关联, 时间关联精度约 ± 400 ps.

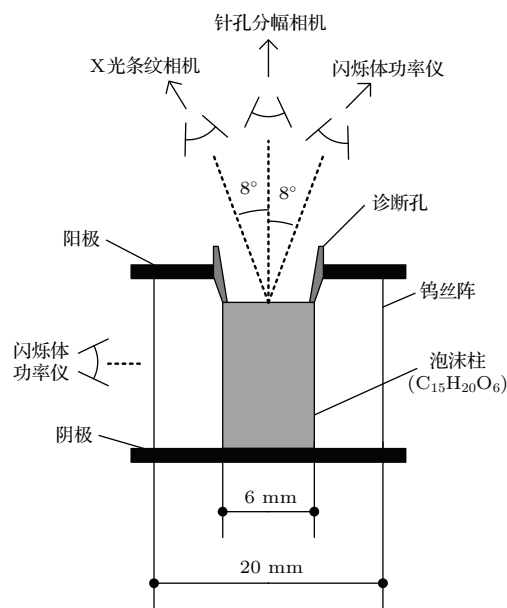


图1 动态黑腔实验布局图

Fig. 1. Dynamic hohlraum schematic diagram.

3 实验结果与讨论

动态黑腔实验的负载及冲击波产生与传播过程都是按轴对称设计的, 理论上冲击波在端面的自发辐射为环状结构. 实验中由轴向端面获得的不同时刻的端面X射线辐射图像见图2. 图中标记的时刻以箍缩滞止时径向X光辐射功率峰值对应的时刻作为时间零点, 本文中所提到的时间都以此为时间零点. 图中红色虚线圆为由理论设计判定得的诊断孔位置, 其大小是由实验条件下的物像关系确定的.

由图2可以看到, 冲击波辐射约从-17 ns进入诊断视野, 以环状逐步向中心传播, 在约-6 ns时汇聚到中心. 若要利用黑腔辐射驱动聚变靶丸, 则需要冲击波形成至传播到中心的时间间隔内完成靶丸的驱动内爆, 该时间段内冲击波波阵面以内黑腔区的辐射温度及均匀性对靶丸内爆至关重要. 由于实验用的负载是为观测冲击波设计的, 泡沫转换体的质量和密度都较大, 冲击波传播速度较慢, 图2中该时间间隔约11 ns, 在为驱动靶丸设计的负载中只有5—6 ns.

图像拍摄时刻与径向X光辐射功率波形的时间对应关系见图3, 功率波形在-21 ns附近有一个峰值, 是钨等离子体主体与泡沫表面碰撞热化产生的辐射^[11], 该辐射峰的前沿(10%—90%)约11 ns, 前沿半高与峰值的间隔约5 ns, 表明钨等离子体沿

径向的质量分布较宽, 以较长的时间逐渐与泡沫作用. 图 2 中拍摄 -27.1 — -21.1 ns 的图像时, 钨等离子体主体尚未到达泡沫边界, 轴向诊断孔内部也未探测到明显辐射, 但诊断孔边缘发光较强, 发光边缘逐渐变长, 发光位置逐渐增多, 但并不向内传播, 表明这是诊断孔自身被加热产生的辐射. 如图 1 所示, 泡沫柱高度小于丝阵高度, 诊断孔紧贴泡沫柱端面, 靠近阳极板的钨等离子体可直接碰撞到诊断孔上. 该现象也表明在 -27 ns 时部分钨等离子体已经到达泡沫边界, 与径向辐射功率开始快速上升相符合. 由等离子体内爆速度约 35 cm/ μ s 可估算得沿径向的质量分布宽度约 3.5 mm, 占丝阵初始半径的 35% , 因此不宜将钨等离子体与泡沫碰撞简化为柱形薄壳的内爆碰撞.

图 2 中 -15.1 — -6.2 ns 的 4 幅图像清晰地反映了冲击波传播过程的辐射分布变化, 辐射环虽然与

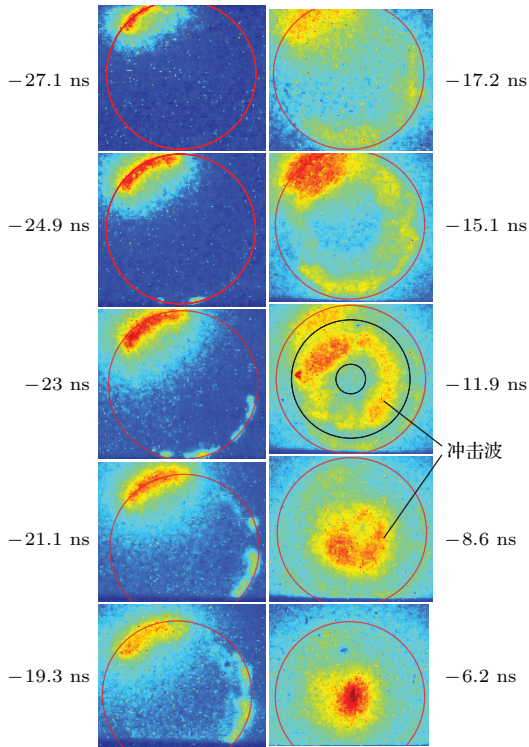


图 2 (网刊彩色) 发次 0180 获得的时间分辨 X 射线轴向辐射图像, 拍摄时刻是以滞止时径向 X 光辐射功率峰位为时间零点, 红色虚线圆为直径 5 mm 的诊断孔, -11.9 ns 的两个黑色点线圆为图 6 方位角分布的分析区域

Fig. 2. (color online) Top end-on time-resolved X-ray pinhole images in shot 0180, corresponding times given nearby each image are defined such that $t = 0$ corresponds to radial peak power at stagnation. Red dash circles indicate the 5 mm diameter diagnostic hole. Two concentric dotted circles in the image at -11.9 ns indicate the regions to azimuthal lineouts plotted in Fig. 6.

理想圆环仍有较大差距, 但环状结构已经很明显, 将其按理想圆环的模型处理可获得不同方位角上的平均效果. 用合适宽度和大小的圆环将辐射环绝大部分框选在内, 以框选区内强度分布的质量中心作为圆心 (即辐射环中心) 做同心圆, 圆周上强度平均值随半径的变化作为径向平均强度分布轮廓线, 如图 4. 在 -15.1 和 -11.9 ns 时, 冲击波未达到的区域, 平均强度基本不随半径变化, 但随时间而增大, 说明中心区受辐射加热比较均匀; 到 -8.6 ns 时, 中心已经没有平均强度较为平坦的区域, 表明冲击波前沿已经有一部分到达轴心; 到 -6.2 ns 时, 中心亮度最大, 平均强度近似随半径而线性减小. 由图 4 可见, 随着辐射环半径缩小, 中心黑腔区的发光强度在增大, 说明黑腔温度在逐渐提高. 提取得到冲击波前沿半径随时间的变化, 如图 5, 可见其半径在线性减小, 说明冲击波以近似恒定速度传播, 这和 Beiley 等^[5] 的测量结果相同. 线性拟合得冲击波传播速度为 (14.2 ± 1.7) cm/ μ s. 结合图 2 和图 4, -11.9 ns 时外径已明显小于诊断孔, 内径前沿离轴心还较远, 辐射环的环状结构最清晰. 由该图测得冲击波平均宽度为 0.96 mm. 分幅相机约 1 ns 的开门时间以及冲击波的高速传播的卷积使测得的冲击波宽度比实际宽度大, 由 14 cm/ μ s 的速度可估算冲击波在 1 ns 时间内传播约 0.14 mm, 故实际宽度为 0.8 — 0.9 mm.

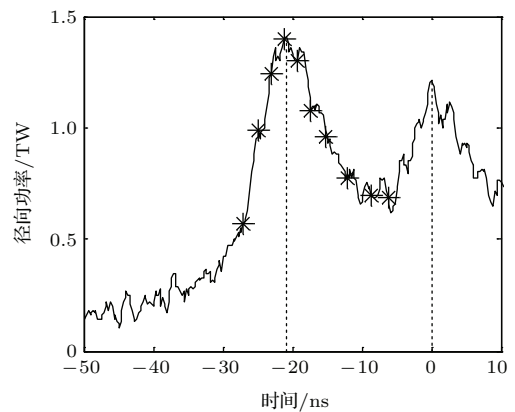


图 3 径向 X 光辐射功率波形 (实线) 及图 2 中各图像的拍摄时刻 (星号)

Fig. 3. Radial X-ray radiation power (solid line) and times for images in Fig. 2. (asterisk).

冲击波辐射是加热动态黑腔中心区的主要热源, 需分析其角向对称性对中心黑腔区受热的均匀性的影响. 图 2 中 -11.9 ns 的图像用两个同心黑色点线圆进行标记, 两个圆围成的环区作为冲击波辐

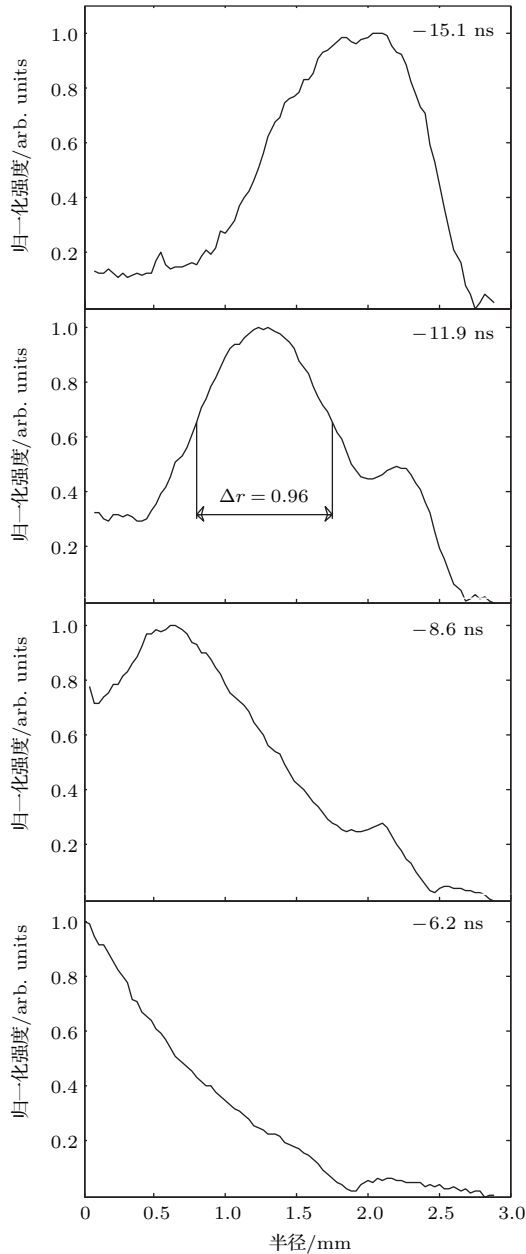


图4 发次0180轴向辐射图像径向分布轮廓线(将图2中拍摄时刻为-15.1, -11.9, -8.6和-6.2 ns的图像以辐射环中心为圆心, 求不同半径同心圆沿圆周的平均强度作为径向分布轮廓线, 为了清晰显示轮廓线结构, 将强度进行了归一化)

Fig. 4. Radial lineouts of end-on X-ray images in shot 0180, corresponding to times of -15.1, -11.9, -8.6 and -6.2 ns. The lineouts are mean intensities along the circumferences aligned to shock emission center. The intensities are normalized for optimizing the visibility of lineouts.

射环, 小圆以内的区域作为黑腔区, 沿角向以 10° 为间隔等分, 分析各个等分区内的平均强度, 得角向强度分布如图6. 可见冲击波辐射环的强度并非随角度随机上下波动, 而是在 -200° — -100° 为一平区, 然后逐渐下降, 在 -100° — 50° 又有一平区,

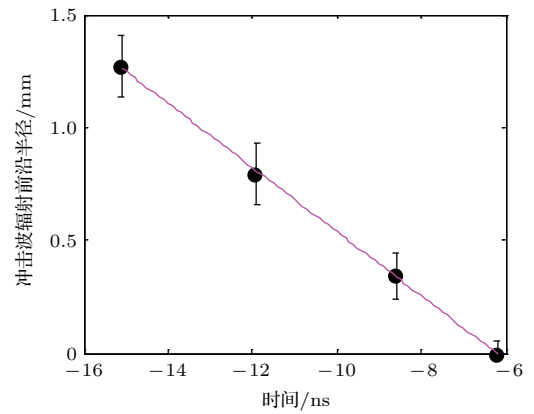


图5 由图4径向分布轮廓线导出冲击波辐射前沿半径随时间的变化, 其中, 黑色点为实验数据, 实线为线性拟合; 拟合得冲击波前沿向心传播速度为 (14.2 ± 1.7) cm/ μ s

Fig. 5. Shock rising edge trajectory inferred from the radial lineouts in Fig. 4. The black points are experimental data and solid line is a linear fit. Fitted shock velocity is (14.2 ± 1.7) cm/ μ s.

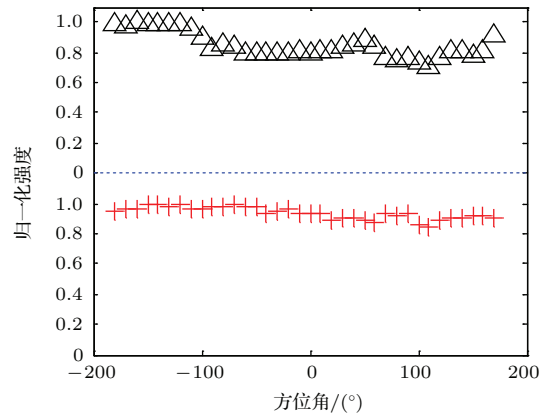


图6 冲击波辐射环(上三角)及中心黑腔区(加号)发光强度随方位角的变化, 其中, 分析的区域在图2的-11.9 ns图像中由两个同心黑色点线圆标记, 沿方位角以 10° 间隔等分; 冲击波辐射环分析的是两个圆围成的环, 中心黑腔区分析的是小圆以内的区域

Fig. 6. Azimuthal lineouts of radiating shock (triangle) and hohlraum (plus) inside the shock ring. The regions are indicated by two concentric circles in the $t = -11.9$ ns image in Fig. 2. The azimuth is evenly divided by 10° . Radiating shock means the area between two circles while hohlraum here means the region in the smaller circle.

大于 50° 的区域也是缓慢地起伏变化, 即冲击波辐射环与角度有较强的关联. 可能原因是钨等离子体冲击泡沫的强度及时间与角度有较强的关联, 通过优化设计负载可将该因素的影响降低到可忽略的程度. 相对而言, 中心黑腔辐射强度与角度的关联要弱得多. 统计得到各等分区的冲击波辐射环与黑腔区的发光强度沿角向分布的标准偏差分别为 $\pm 10\%$ 和 $\pm 4.2\%$, 后者的不均匀性约为前者的一半,

表明经过辐射运输后冲击波不均匀性对黑腔辐射的影响有所减缓. 当然, 端面辐射的图像是不同高度位置的辐射沿着轴向积分的结果, 角向的不均匀性已经被部分抹平. 泡沫柱不同高度的横截面内的辐射角向均匀性是否也有相同的演化特性, 还有待进一步的实验研究.

4 结 论

在“聚龙一号”装置上利用单层钨丝阵加载重泡沫的负载, 初步研究了Z箍缩动态黑腔中冲击波传播和黑腔形成的物理过程. 在国内首次获得了冲击波辐射环的演化图像, 结合其他诊断数据, 分析了丝阵等离子体与泡沫的作用过程及动态黑腔内的辐射特性, 推导出冲击波的传播速度、冲击波宽度及辐射强度的角向均匀性. 结果表明中心黑腔区的辐射强度沿角向的标准偏差约为辐射环的一半. 在文献[4]的研究中, 冲击波受箍缩丝阵等离子体不稳定性的影响很小. 可见, 从钨等离子体、到冲击波辐射、再到黑腔辐射, 角向均匀性在逐步提高, 这对Z箍缩动态黑腔驱动的ICF是一个重要的有利因素. 本实验结果可为动态黑腔相关理论研究和数值模拟提供校验基础, 以便优化设计负载以获得高温、均匀性更好的黑腔. 进一步的工作是开展丝阵与泡沫质量匹配的条件下的动态黑腔特性研究, 排除诊断孔自发光的影响, 获得高精度的轴向辐射功率, 尝试通过掺杂元素光谱等诊断技术获得黑腔辐射温度等更多内部的物理特性.

感谢北京应用物理与计算数学研究所Z箍缩小组对本实验的指导, 并对中国工程物理研究院激光聚变研究中心负载制备小组和中国工程物理研究院流体物理研究所“聚龙一号”装置运行维护人员的辛勤劳动及对本实验的支持表示感谢.

参考文献

[1] Leaper R J, Alberts T E, Asay J R, Baca P M, Baker K L, Breeze S P, Chandler G A, Cook D L, Cooper G W, Deeney C, Derzon M S, Douglas M R, Fehl D L, Gilliland T, Hebron D E, Hurst M J, Jobe D O, Kellogg J W, Lash J S, Lazier S E, Matzen M K, McDaniel D H, McGurn J S, Mehlhorn T A, Moats A R, Mock R C, Muron D J, Nash T J, Olson R E, Porter J L, Quintenz J P, Reyes P V, Ruggles L E, Ruiz C L, Sanford T W L, Schmidlapp F A, Seaman J F, Spielman R B, Stark M A, Struve K W, Stygar W A, Tibbetts-Russell D R,

Torres J A, Vargas T, Wagoner T C, Wakefield C, Hammer J H, Ryutov D D, Tabak M, Wilks S C, Bowers R L, McLenithan K D, Peterson D L 1999 *Nucl. Fusion* **39** 1283

[2] Nash T J, Derzon M S, Chandler G A, Leeper R, Fehl D, Lash J, Ruiz C, Cooper G, Seaman J F, McGurn J, Lazier S, Torres J, Jobe D, Gilliland T, Hurst M, Mock R, Ryan P, Nielsen D, Armijo J, McKenney J, Hawn R, Hebron D, MacFarlane J J, Petersen D, Bowers R, Matuska W, Ryutov D D 1999 *Phys. Plasmas* **6** 2023

[3] Slutz S A, Bailey J E, Chandler G A, Bennett G R, Cooper G, Lash J S, Lazier S, Lake P, Lemke R W, Mehlhorn T A, Nash T J, Nielson D S, McGurn J, Moore T C, Ruiz C L, Schroen D G, Torres J, Varnum W, Vesey R A 2003 *Phys. Plasmas* **10** 1875

[4] Bailey J E, Chandler G A, Slutz S A, Bennett G R, Cooper G, Lash J S, Lazier S, Lemke R, Nash T J, Nielsen D S, Moore T C, Ruiz C L, Schroen D G, Smelser R, Torres J, Vesey R A 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 095004

[5] Bailey J E, Chandler G A, Mancini R C, Slutz S A, Rochau G A, Bump M, Buris-Mog T J, Cooper G, Dunham G, Golovkin I, Kilkenny J D, Lake P W, Leeper R J, Lemke R, MacFarlane J J, Mehlhorn T A, Moore T C, Nash T J, Nikroo A, Nielsen D S, Peterson K L, Ruiz C L, Schroen D G, Steinman D, Varnum W 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056301

[6] Sanford T W L, Nash T J, Mock R C, Apruzese J P, Peterson D L 2006 *Phys. Plasmas* **13** 012701

[7] Rochau G A, Bailey J E, Maron Y, Chandler G A, Dunham G S, Fisher D V, Fisher V I, Lemke R W, MacFarlane J J, Peterson K J, Schroen D G, Slutz S A, Stambulchik E 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 125004

[8] Slutz S A, Peterson K J, Vesey R A, Lemke R W, Bailey J E, Varnum W, Ruiz C L, Cooper G W, Chandler G A, Rochau G A, Mehlhorn T A 2006 *Phys. Plasmas* **13** 102701

[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] Jiang S Q, Ning J M, Chen F X, Ye F, Xue F B, Li L B, Yang J L, Chen J C, Zhou L, Qin Y, Li Z H, Xu R K, Xu Z P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 155203 (in Chinese) [蒋树庆, 甯家敏, 陈法新, 叶繁, 薛飞彪, 李林波, 杨建伦, 陈进川, 周林, 秦义, 李正宏, 徐荣昆, 许泽平 2013 物理学报 **62** 155203]

[11] Xiao D L, Ding N, Ye F, Ning J M, Hu Q Y, Chen F X, Qin Y, Xu R K, Li Z H, Sun S K 2014 *Phys. Plasmas* **21** 042704

[12] Xiao D L, Sun S K, Zhao X K, Ding N, Wu J M, Dai Z H, Yin L, Zhang Y, Xue C 2015 *Phys. Plasmas* **22** 052709

[13] Dan J K, Ren X D, Huang X B, Zhang S Q, Zhou S T, Duan S C, Ou Y K, Cai H C, Wei B, Ji C, He A, Xia M H, Feng S P, Wang M, Xie W P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 245201 (in Chinese) [但加坤, 任晓东, 黄显宾, 张思群, 周少彤, 段书超, 欧阳凯, 蔡红春, 卫兵, 计策, 何安, 夏明鹤, 丰树平, 王勳, 谢卫平 2013 物理学报 **62** 245201]

Shock X-ray emission image measurement in Z-pinch dynamic hohlraum*

Meng Shi-Jian[†] Huang Zhan-Chang Ning Jia-Min Hu Qing-Yuan Ye Fan
Qin Yi Xu Ze-Ping Xu Rong-Kun

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

(Received 8 December 2015; revised manuscript received 12 January 2016)

Abstract

Owing to high efficiency for delivering thermal radiation from Z-pinch plasma to an inertial fusion capsule, Z-pinch dynamic hohlraum (ZPDH) is a promising indirect-drive inertial confinement fusion (ICF) approach. ZPDH is created by accelerating an annular tungsten Z-pinch plasma radially inward to an internal low density convertor. The collision launches a radiating shock traveling inward. Radiations emitted from the shock, after being trapped and thermalized by the optically thick tungsten plasma, drive the internal fusion capsule to implode. In our previous experiments, shock propagating process has never been imaged or even never been formed, due to low drive current (about 1.3 MA). In this paper, the ZPDH has a load of single tungsten wire array embedded in a cylindrical 16 mg/cm³ C₁₅H₂₀O₆ foam, and the tungsten wire array is explored using JuLong-1 facility (also named PTS facility) driven by current with a peak value of 7–8 MA and rising time of 60–70 ns (from 10% to 90%). Several results are presented for improving the understanding of the physics of the shock propagating and hohlraum forming. For the high optical depth in tungsten plasmas around the foam, radially directly diagnosing hohlraum radiation distribution along axis is impossible. The most convenient way to diagnose the radiation symmetry and the shock evolution is to take the end-on X-ray images. The time-resolved X-ray images of annular radiating shock evolution, which are performed with a 10-frame time-gated X-ray pinhole camera located at 0° with respect to the Z-pinch axis, are obtained for the first time in China. By analyzing the radial X-ray emission power waveform and intensity distribution of end-on radiation image, the process of wire array plasma impacting on the foam convertor and properties of dynamic hohlraum radiation are discussed. The shock emission structures are found to be circular, similar to the results predicted theoretically. The shock velocity which seems to be constant in the whole process of inward propagating is linearly fitted to be (14.2 ± 1.7) cm/μs. The annular width of shock emission is 0.8–0.9 mm, which is inferred from the full width at half maximum of radial lineout of end-on X-ray image at time $t = -11.9$ ns and the blurring effect of shock velocity. The radiation symmetry is assessed by statistic property of mean intensity of 36 sectors of end-on X-ray image evenly divided by 10°. The standard deviation of azimuthal shock emission intensity is $\pm 10\%$ while that of hohlraum region prior to shock impact is $\pm 4.2\%$. The azimuthal symmetry improvement from shock emission to hohlraum radiation is a piece of exciting news for ZPDH driven ICF.

Keywords: Z-pinch, dynamic hohlraum, radiating shock, frame camera

PACS: 52.58.Lq, 52.59.Qy, 52.70.La

DOI: 10.7498/aps.65.075201

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11135007, 11305154).

[†] Corresponding author. E-mail: mengsj04@163.com