

Z 箍缩动态黑腔动力学及辐射特性初步实验研究*

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

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2012年10月10日收到; 2013年3月25日收到修改稿)

在“强光一号”装置进行的 Z 箍缩动态黑腔实验中, 初步系统研究了动态黑腔的内爆动力学特性及辐射特性的一般规律. 通过高空间分辨图像, 对丝阵与泡沫黑腔碰撞前后泡沫辐射场的变化, 泡沫对不稳定性发展的抑制开展了细致研究. 实验结果显示, 动态黑腔负载内爆的辐射功率波形呈现双峰结构, 首峰和主峰分别对应于碰撞和滞止过程. 8 mm 负载的内爆速度高于 12 mm 负载, 但其他内爆动力学参数和辐射参数均无明显差异. 实验使用的泡沫黑腔能够很好地抑制不稳定性的发展, 但在泡沫内部未能实现对辐射的均匀控制, 滞止泡沫等离子体柱上仍能轻易区分辐射较强和辐射较弱的区域.

关键词: Z 箍缩动态黑腔, 泡沫黑腔, 动力学特性, 辐射特性

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

DOI: 10.7498/aps.62.155203

1 引言

黑腔是实现 Z 箍缩驱动惯性约束聚变的桥梁, 其主要作用是作为氘氚 (DT) 靶丸内爆创造一个尽可能均匀、对称的辐射环境^[1-5]. 动态黑腔的核心思想是利用高速运动的单层或双层丝阵 Z 箍缩内爆等离子体撞击内置的中心泡沫柱 (通常氘氚靶丸被置于泡沫柱的中心), 碰撞产生的冲击波在泡沫中传播, 产生 X 射线辐射冲击波, 辐射被限制在外部丝阵高 Z 等离子体内部, 进而形成一个受约束的辐射环境^[6-8]. 在动态黑腔中, Z 箍缩等离子体辐射源、动能—X 射线能量转换体、聚变靶丸紧密地耦合在一起, 它们之间的能量耦合效率较高, 可以在驱动电流较低的 Z 箍缩装置上开展相关的实验研究, 预计可以在较低的驱动电流水平下实现聚变点火^[9-12].

由于驱动器能力的限制, 国内的研究主要集中于利用实验对宏观物理过程的把握和修正用于动力学黑腔模拟的程序上^[13-15]. 在实验研究方面, 徐荣昆等人在 Angara-5-1 装置上开展了黑腔辐射

与负载参数的关联性的研究, 得到的最高泡沫辐射温度为 62.7 eV, 90 根 W+3 mm 直径泡沫和 128 根 W+3 mm 直径泡沫辐射温度都较高, 六发平均达到 60.0 eV. 杨建伦在 Angara-5-1 实验中获得了从丝阵内爆边界开始运动到泡沫外表面及压缩到心和最终飞散的全过程 X 射线辐射图像, 观测到主要物理过程的图像特征, 提供了黑腔边界动态变化的信息.

本文利用多种先进诊断系统, 在“强光一号”装置上对 Z 箍缩动态黑腔的内爆动力学和辐射特性进行了初步的实验研究, 内容包括动态黑腔负载内爆的辐射功率波形呈现双峰结构与动态黑腔内爆动力学特征的关系, 主要的内爆动力学和辐射参数, 泡沫柱的分流比例等. 并结合激光阴影像、X 射线分幅像和多通道针孔像等高空间分辨图像, 研究了泡沫黑腔辐射场的形成过程、泡沫对不稳定性的抑制. 对把握 Z 箍缩动态黑腔内爆的基本物理过程, 开展 Z 箍缩驱动 ICF 的动态黑腔物理设计打下了实验基础.

2 实验设置及诊断系统

实验在强光一号装置进行, 装置在稳定运行

* 国家自然科学基金 (批准号: 11135007, 11005096) 和中国工程物理研究院核物理与化学研究所创新基金 (批准号: 2011CX03) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: jiangshq@aliyun.com

状态下负载电流约 1.2—1.4 MA^[16]. 实验中使用的负载线质量约为 110 μg/cm, 动态黑腔负载中用于驱动泡沫黑腔的丝阵直径有 8 mm 和 12 mm 两种, 以比较不同直径丝阵对黑腔辐射的影响. 泡沫黑腔材料采用三羟甲基三丙烯酸酯, 泡沫分子式 C₁₅H₂₀O₆. 泡沫直径为 3 mm, 直径不确定度 0.1 mm. 泡沫密度 10 ± 1 mg/cm³, 密度均匀性不低于 90%. 实验状态下的典型负载如图 1 所示, 具体参数见表 1.

使用的诊断系统^[17,18]包括一维可见光条纹像(可见光辐射区沿径向随时间变化图像)测量系统, 径向 X 射线功率测量仪, 磁探针, 四分幅激光阴影像系统, 门控多通道纳秒分幅相机, 时间积分针孔相机, 多幅针孔相机和多通道 X 射线能谱仪. 获得的数据包括内爆动力学参数, 辐射参数及辐射图像. 一维可见光条纹像测量系统采用 25.4 mm × 25.4 mm 透紫石英柱面凸透镜对箍缩区域成像, 并通过前置的中心波长 400 nm, 带宽 50 nm 滤光片获得一维可见光条纹像. 系统时间分辨为 4.3 ns, 空间分辨率优于 250 μm. 径向功率仪用来获得 X 射线辐射功率并估算 X 射线辐射能量, 该系统响应时间小于 3 ns, 灵敏度在软 X 射线能段内保持线性, 对 50—1250 eV 能量段的光子具备坪能量相应的特点, 功率仪的测量不确定度在 15% 以内. 磁探针的感应线圈(探针前端)和部分屏蔽管

置于丝阵内爆区域, 当等离子体电流变化时, 其相应的磁场随之改变, 探针线圈中产生感应信号, 通过测量感应信号可获得磁场和电流信息. 激光阴影像使用直接透射成像, 对等离子体的极限探测密度达到 2 × 10²⁰ cm⁻³, 时间分辨为 5 ns, 空间分辨为 70 μm. 分幅相机像增强器的门控时间为 1.5 ns, 幅间间隔在 2—10 ns 内可调, 空间分辨率 100 μm, 可对 100—10 keV 能量范围内的 X 射线辐射在极短时间内多幅成像. 多幅针孔像使用多种材料和厚度的金属膜作为滤片, 可获得不同能区的高分辨 X 射线积分图像. 多通道 X 射线能谱仪通过多层膜反射镜 + X 射线滤片 + 闪烁体 + 光电倍增管的方式可测量 405 eV, 440 eV, 475 eV 三种能量的 X 射线辐射功率, 时间响应可达 5 ns, 当用于测量电子温度时, 可以给出不确定度小于 20% 的温度值.

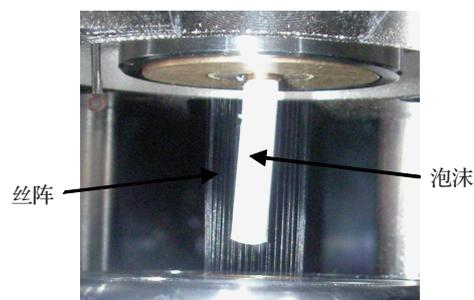


图 1 Z 箍缩动态黑腔负载(钨丝阵加泡沫)负载

表 1 动态黑腔实验负载参数

负载构成	单丝直径/μm	丝根数	丝阵直径/mm	丝阵高度/mm	泡沫直径/mm	泡沫长度/mm
W+ 泡沫	4.2	42	12	20	3	~ 17
W+ 泡沫	4.2	42	8	20	3	~ 17

3 实验结果及分析

3.1 动态黑腔内爆过程及辐射、内爆动力学参数分析

图 2 和图 3 分别给出了直径为 8 mm 和 12 mm 两种丝阵负载的典型实验结果. 图 2(a), 图 3(a) 分别为 8 mm, 12 mm 丝阵的径向 X 射线功率、电流波形与一维可见光条纹像的时间对应关系, 图 2(b), 图 3(b) 为通过可见光条纹像获得的内爆轨迹. 波形与图像的对应关系通过时间关联确定. 从图中可以看到, 丝阵与泡沫撞击前, 主体钨等离子体的

内爆速度为 10⁷ cm/s 量级, 与泡沫撞击后, 等离子体运动轨迹呈现显著变化, 钨等离子体与泡沫等离子体整体箍缩速度降低至 10⁶ cm/s 量级. 主体钨等离子体与泡沫撞击后, 丝阵动能一部分转化为内能, 使得电子和辐射温度升高, 产生较强的 X 射线辐射, 表现为径向功率波形上的第一个功率峰(功率首峰). 其后, 另一部分丝阵动能将钨等离子体与泡沫等离子体整体压缩, 在压缩到心后形成第二个功率峰(后续分析中, 定义该峰为功率主峰, 峰值时刻确定为 t = 0 时刻), 在主峰后, 常出现第三个功率峰(第三峰), 其与动态黑强辐射之间的关系将在 2.2 节末讨论.

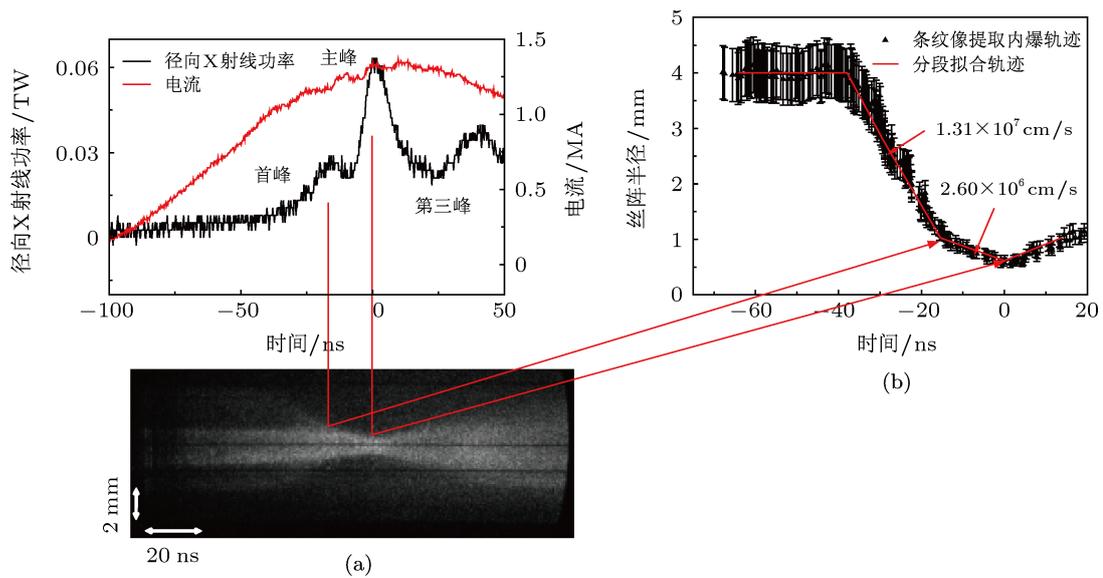


图2 8 mm 负载 (11287 发次) 实验数据 (a) 功率、电流波形与一维可见光条纹像的时间对应关系; (b) 由一维可见光条纹像获得的内爆轨迹

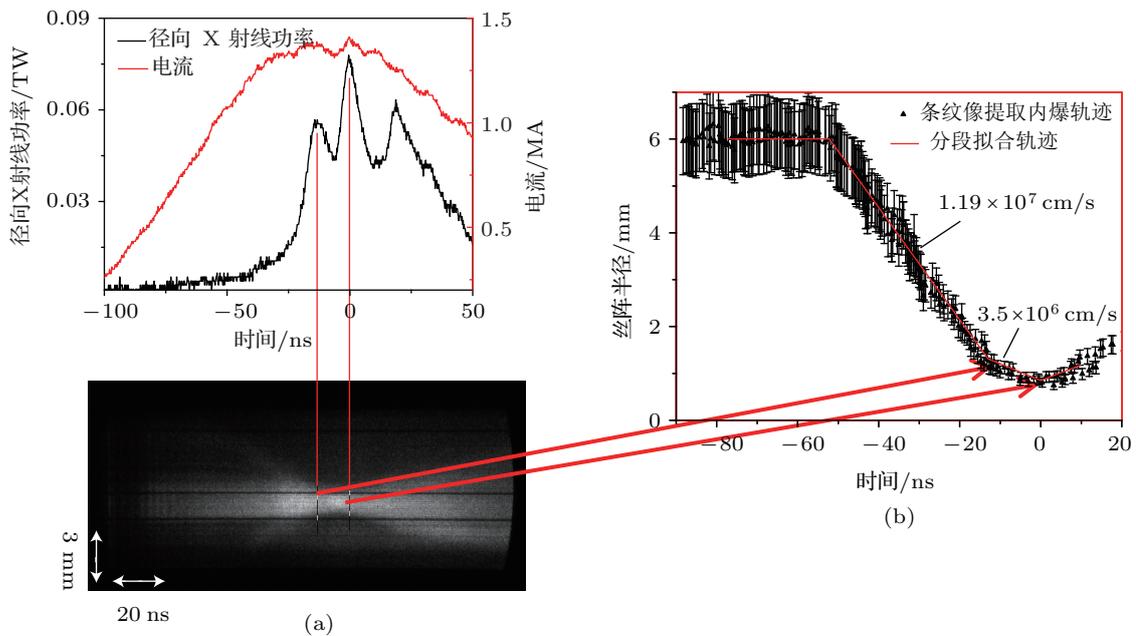


图3 12 mm 负载 (11293 发次) 实验数据 (a) 功率、电流波形与一维可见光条纹像的时间对应关系; (b) 由一维可见光条纹像获得的内爆轨迹

图 4(a), (b) 分别是使用 MARED 程序对动态黑腔辐射功率, 钨等离子体壳外、内边界和泡沫外边界演化过程的模拟, 反应的主体钨等离子体撞击泡沫前的加速内爆 (I), 钨主体等离子体撞击泡沫、泡沫再压缩及滞止 (II) 和反弹飞散 (III) 等动态黑腔负载内爆过程与实验一致。

如图 5, 图 6 所示, 8 mm 负载径向 X 射线辐射主峰功率集中在 0.06—0.1 TW, 平均功率为 0.078 TW; 12 mm 负载主峰功率处于同一区间, 平均功率为 0.081 TW. 8 mm 负载的首峰功率分布于 0.02—0.09 TW, 平均功率为 0.043 TW; 12 mm 负载

首峰功率分布区间相对集中, 处于 0.04—0.06 TW, 平均功率为 0.054 TW. 8 mm 负载 X 射线功率首峰的强度约为主峰的 40%—60%, 平均达到 53.2%; 12 mm 负载的首峰 - 主峰强度比略大, 处于 60%—80% 之间, 平均为 69.7%。

对于首峰-主峰之间的时间间隔, 8 mm 负载分布略广, 径向首峰集中出现在主峰前 9—18 ns, 平均为 13.25 ns; 12 mm 负载的径向首峰集中出现在主峰前 12—14 ns, 平均为 12.18 ns. 两种负载在辐射功率及首峰、主峰出现时刻均未出现明显的差异。

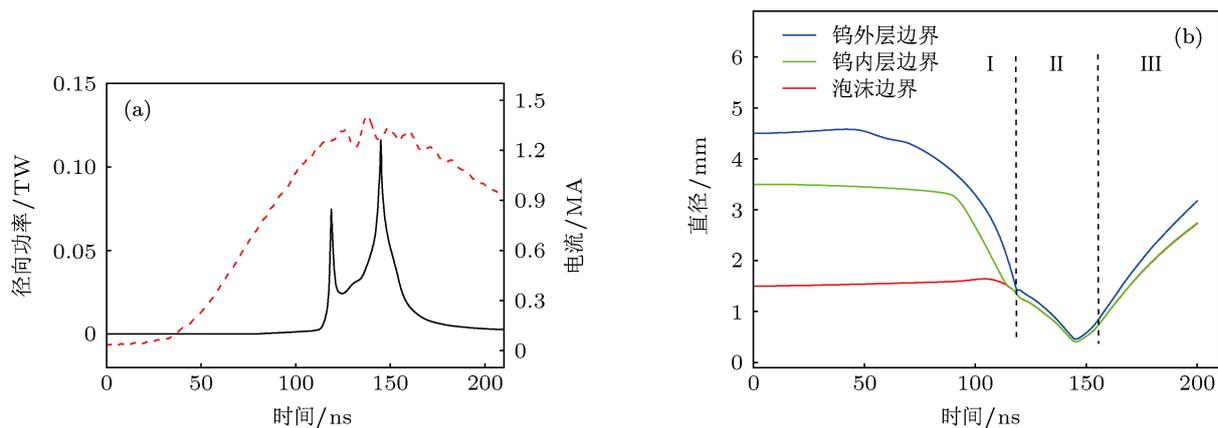


图4 直径 12 mm 负载 MHD 程序计算结果 (a) 径向辐射功率和电流; (b) 钨等离子体壳外、内边界, 泡沫区外边界随时间的演化

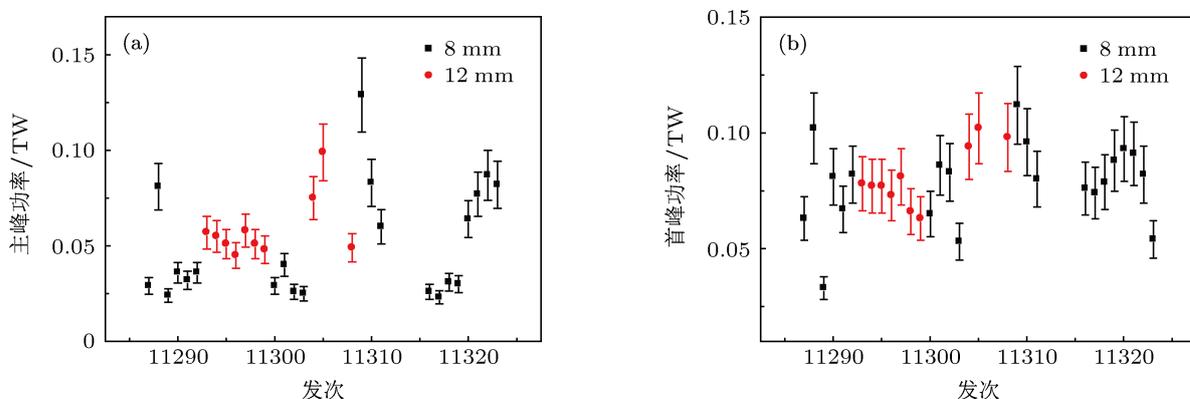


图5 8 mm 负载和 12 mm 负载辐射功率 (a) 主峰辐射功率; (b) 首峰辐射功率

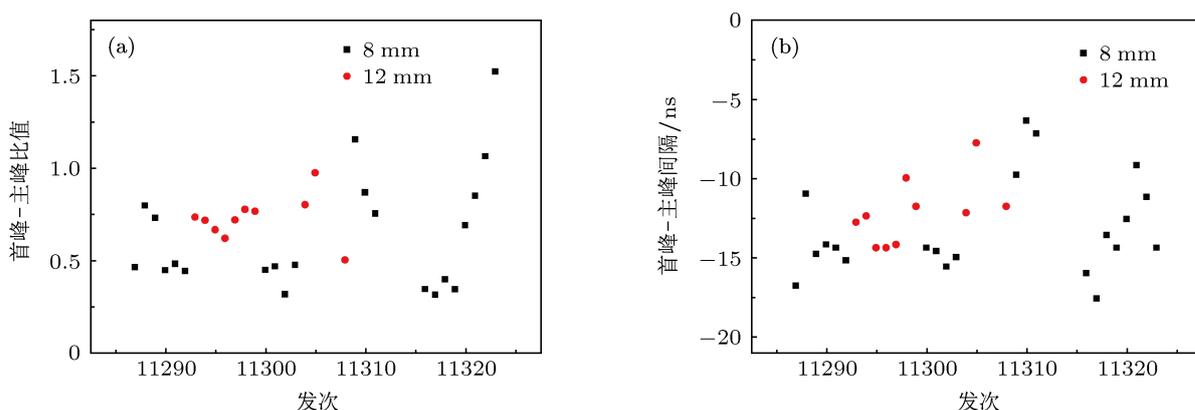


图6 8 mm 负载和 12 mm 负载功率数据 (a) 动态黑腔首峰-主峰辐射功率比值; (b) 首峰、主峰功率峰值时刻之间的时间间隔

本文讨论的动态黑腔实验的各项内爆动力学参数来自于拟合一维可见光条纹像获得的内爆轨迹, 数据处理带来的不确定度为 12%。如图 7 至图 9 所示。图 7(a) 为丝阵与泡沫黑腔碰撞前的内爆速度, 8 mm 负载的内爆速度集中在 $(1.3\text{—}1.6) \times 10^7$ cm/s, 平均达到 1.45×10^7 cm/s; 12 mm 负载的内爆速度集中在 $(1.0\text{—}1.3) \times 10^7$ cm/s, 平均速度略小, 为 1.21×10^7 cm/s。在与丝阵内爆等离子体发生

碰撞后, 泡沫出现了一定程度的收缩。泡沫区收缩速度及收缩的最小尺寸见图 7(b) 和图 8, 两种负载泡沫区收缩速度均分布在 $(3.5\text{—}5.5) \times 10^6$ cm/s 区间内, 8 mm 负载平均为 4.62×10^6 cm/s, 12 mm 负载平均为 4.57×10^6 cm/s, 未出现明显的差异。8 mm 负载泡沫区域收缩的空间最小处的直径在 1.3—1.7 mm 范围内, 平均值为 1.46 mm, 小于 12 mm 负载最小直径的平均值 1.79 mm。

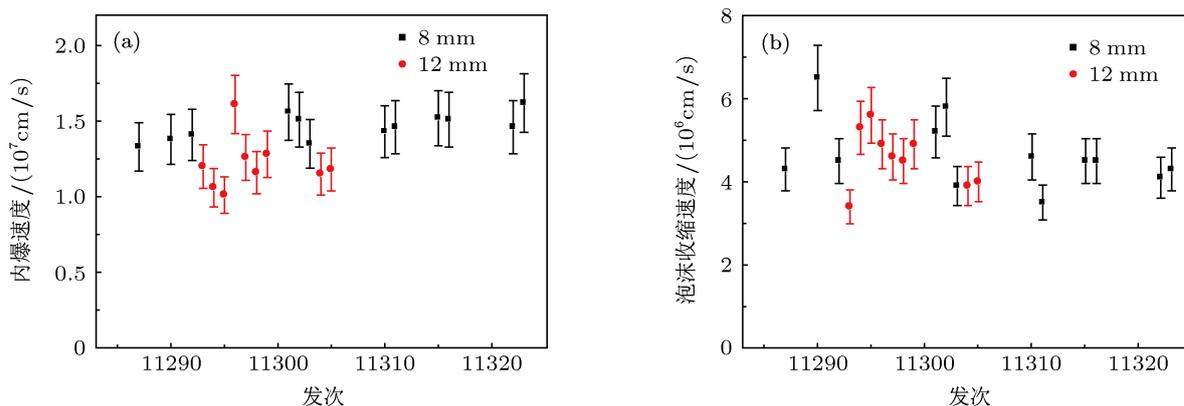


图7 8 mm 和 12 mm 两种负载速度参数 (a) 内爆速度; (b) 泡沫区收缩速度

负载在内爆阶段的持续时间(等离子体开始向心箍缩至碰撞到泡沫黑腔的时间)和泡沫收缩阶段持续时间(等离子体撞击泡沫至泡沫收缩至最紧处的时间间隔)如图9(a), (b)所示. 8 mm 负载内爆阶段持续时间集中在 12—23 ns, 平均为 17.31 ns; 12 mm 负载内爆阶段的持续时间略长, 分布在 18—35 ns 的区间内, 平均为 22.38 ns. 两种负载泡沫区收缩阶段的持续时间均分布在 10—20 ns 内, 8 mm 负载平均为 14.38 ns, 12 mm 负载平均为 13.71 ns, 未出现明显差异.

8 mm 负载是针对强光一号装置驱动能力相对优化的负载, 根据一维条纹像获得的动力学参数, 8 mm 负载内爆速度较高, 在假设参与内爆的负载质量相近的条件下, 8 mm 负载的动能较大. 但 8 mm 负载较 12 mm 负载首峰的辐射功率及首峰-主峰功率比值并未显示出较大的差异. 由于两种

负载在泡沫区收缩速度、收缩持续时间、泡沫区径向最小尺寸并无明显差异, X 射线功率也近乎相同, 因此动态黑腔的能量转化过程以及辐射状态具体与哪些因素有关还需进一步研究.

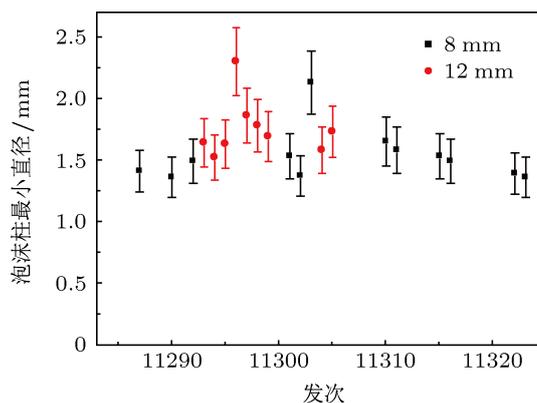


图8 泡沫区域收缩的空间最小尺寸

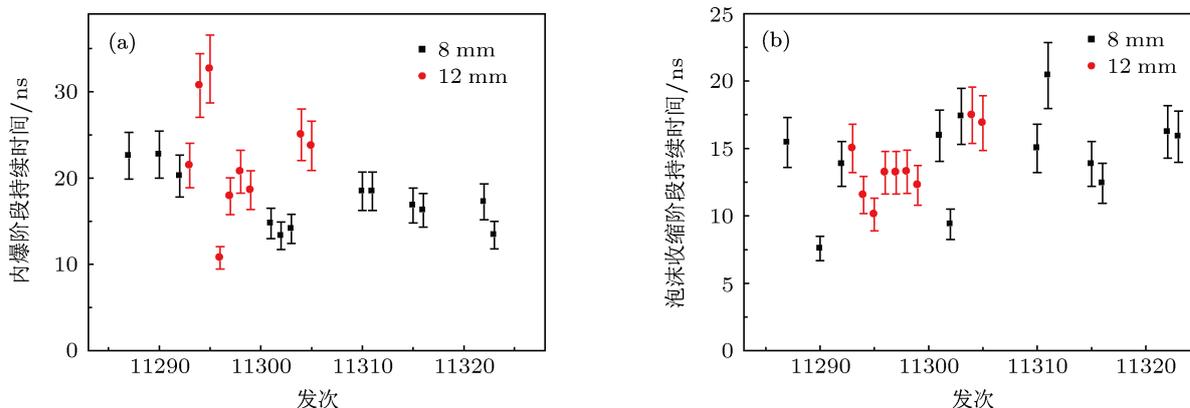


图9 8 mm 负载和 12 mm 负载各阶段持续时间 (a) 内爆阶段的持续时间; (b) 泡沫收缩阶段持续时间

3.2 动态黑腔辐射场主要特征

设计动态黑腔的初衷目标之一是利用置放于丝阵中心的泡沫柱减少 RT 不稳定性对滞止等离子

体的影响, 以期获得更集中的 X 射线辐射 [19,20], 其中泡沫与内爆等离子体撞击对泡沫柱的影响是一个重要的物理过程. 为确定泡沫柱的分流对负载内爆过程的影响, 使用磁探针监测了泡沫柱区域电流

的分布情况.

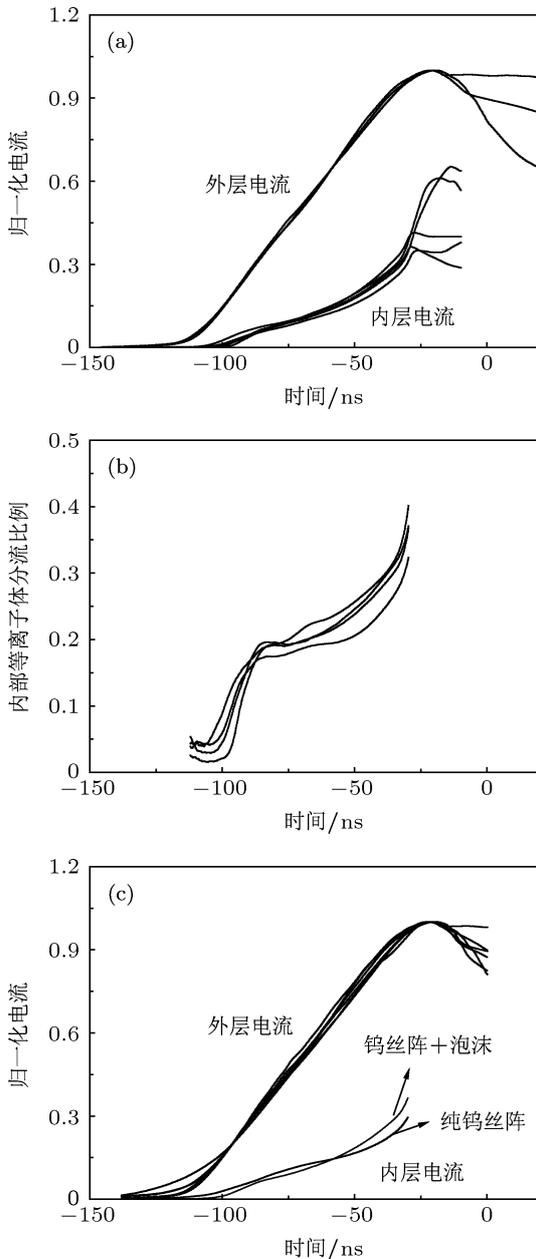


图 10 磁探针对 W 丝阵 + 泡沫和纯 W 丝阵两种负载在外层、内层电流测点的测量结果 (a) 归一化后钨丝阵 + 泡沫负载的内外层探针诊断电流; (b) 钨丝阵 + 泡沫负载内层探针电流与相应的外层探针电流的比例关系; (c) 钨丝阵 + 泡沫、纯钨丝阵两种负载的磁探针诊断结果对比

图 10 是使用磁探针对 W 丝阵 + 泡沫和纯 W 丝阵两种负载在外层、内层电流测点的测量结果. 外层电流测点位于丝阵外部 1 mm 处, 测量负载的总电流; 内层电流测点位于半径约 3 mm 处, 测量泡沫所处位置的电流分布情况, 图中结果均已按实测半径修正. 测量结果表明, 泡沫加载后, 早期等离子体的电流通道较为一致, 电流值涨落较小. 在丝阵消融阶段, 泡沫柱区域内 (直径 3 mm 处) 分流约占

总电流的 20%, 主体内爆开始前达到 30%, 与纯钨丝阵先驱等离子体中的分流相近.

根据唯象的火箭模型^[21], 丝阵中单丝消融率可表示为

$$\frac{dm}{dt} = \frac{J \times B}{V_{\text{cor}}} = \frac{\mu_0 I^2}{V_{\text{cor}} 4\pi^2 R_0}, \quad (1)$$

其中 I 为负载电流, R_0 为丝阵半径. V_{cor} 是晕等离子体向轴心运动的速度, 表示为

$$V_{\text{cor}} = 1.5 \times 10^7 (1 - \exp(-x/3.4)), \quad (2)$$

V_{cor} 的单位是 cm/s, $x = \text{gap}/\text{core} \cdot \text{size}$ (其中 gap 为丝间隙, core size 为芯直径). 研究表明, 钨丝阵的丝芯直径大约在 0.1 mm^[22], 按 (2) 式, 丝间隙在 0.5—1 mm 的范围内不会影响消融等离子体径向速度. 根据上述分析, 负载并未出现较大程度的分流, 丝阵消融和内爆过程并未受到泡沫柱的影响.

在主体等离子体与泡沫发生碰撞前, 由丝阵消融出的晕等离子体已和泡沫柱发生了作用, 并对泡沫所处的状态造成了一定的影响. 假设丝阵的所有消融质量均达到泡沫表面, 根据 (1) 式, 泡沫柱表面的能量沉积率 (dQ/dt) 可初步估算为

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{V_{\text{cor}}^2}{2 \cdot 2\pi R_F} \frac{dm}{dt} = \frac{V_{\text{cor}} \mu_0}{16\pi^2 R_0 R_F} [I(\tau)]^2, \quad (3)$$

其中 R_F 分别为泡沫的半径, I 是消融等离子体流与泡沫撞击时 ($\tau = t - (R_0 - R_F)/V_{\text{cor}}$) 电流的瞬时强度.

除能量沉积之外, 先驱等离子体具有大量的动能会在较长的时间周期内对泡沫造成影响, 动能 P 也可用丝阵消融速率估算, 表示为

$$p = \frac{1}{2\pi R_F} V \frac{dm}{dt} = \frac{\mu_0}{8\pi^2 R_0 R_F} [I(\tau)]^2. \quad (4)$$

通过激光阴影像和 X 射线分幅像, 可以观察不同尺寸丝阵先驱等离子体与泡沫的作用过程, 实验采用的 CHO 泡沫密度为 15 mg/cm³, 柱体直径为 1.6 mm. 将 11298 发次 -30 ns 时刻的电流数据代入能量沉积率计算公式可知, 主体内爆开始时沉积的能量约为 3 GW/cm², 相当于 10 eV 的黑体辐射, 此刻泡沫表面的动压约为 5—10 kbar (1 bar = 10⁵ Pa). 由于泡沫柱直径在丝阵主体内爆前并未出现明显的变化, 可以理解为在先驱等离子体的影响下, 虽然泡沫表面存在较大的动压, 但不足以克服泡沫柱自身密度的阻力以及温度上升增加的热压. 图 11 为 11288 发次消融阶段的激光阴影像, 从峰前 51.5 ns (-51.5 ns) 至峰前 37.5 ns (-37.5 ns), 泡沫柱直径未出现缩减, 一直稳定在 3 mm.

与纯钨丝阵类似^[23], 消融阶段不稳定性扰动处于较稳定的状态, 自内爆阶段出现断丝后, 主导波长开始向长波长方向发展, 见图 12, 图 12(c), (d) 是 (a), (b) 局部不稳定性波长发展的情况, 在峰前 29.7 ns(即为 -29.7 ns), 不稳定主导波长小于

0.3 mm, 在 -24.3 ns 时, 部分区域的不稳定波长已接近 0.4 mm. 随着不稳定性的发展, 泡-钉结构 (bubble-spike 结构) 开始出现. 直至内爆阶段开始前, 负载内爆的动力学过程较普通丝阵出现并未出现明显差异.

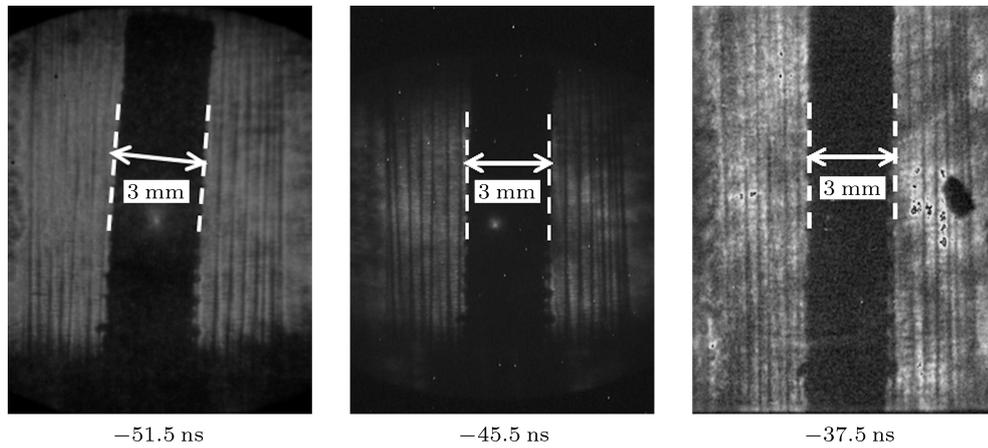


图 11 11288 发次消融阶段激光阴影像

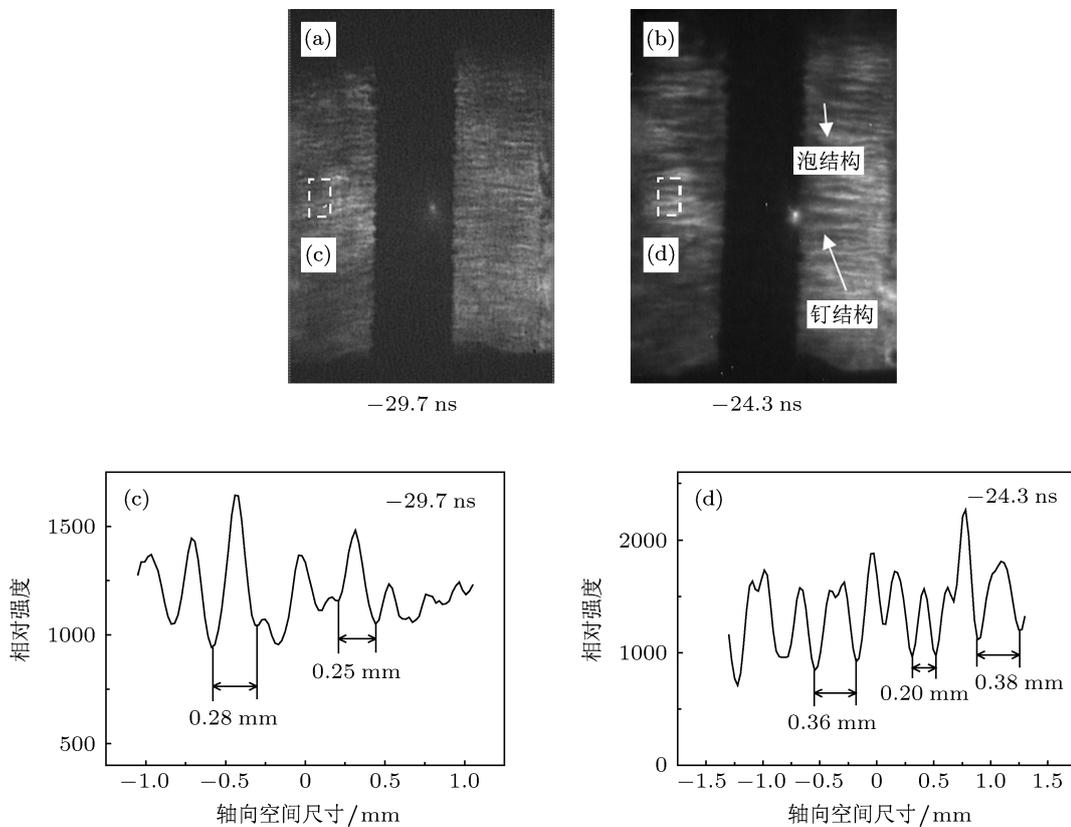


图 12 负载在内爆阶段的内爆阶段的图像及不稳定性波长 (a), (b) 激光阴影像; (c), (d) 局部区域的不稳定性主导波长 (11292 发次)

图 13 是 11303 发次 X 射线功率 -20.6 ns 至 -5 ns 的激光阴影像, bubble-spike 结构所引起的泡沫表层不稳定性扰动在泡沫柱的作用下得到了很

好地抑制, 虽然大量主体等离子体与泡沫的碰撞使得泡沫柱出现类似腊肠不稳定性的特征, 但未进一步影响到滞止等离子体.

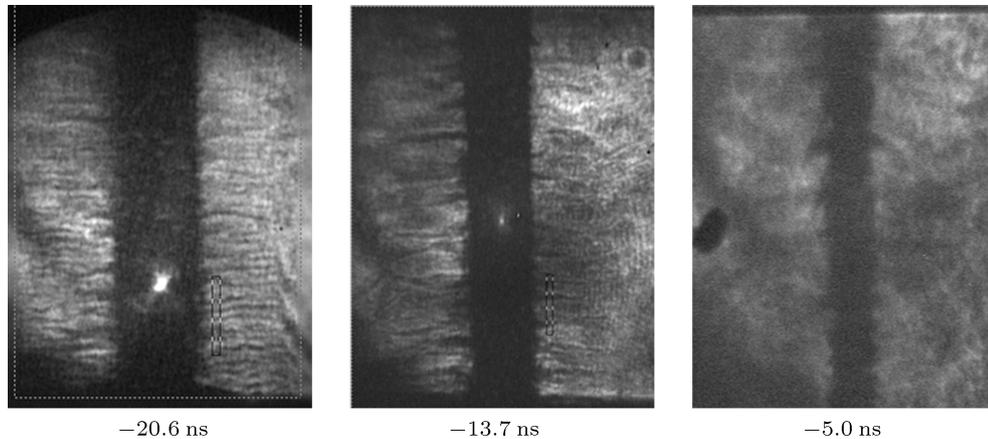


图 13 负载内爆后期至滞止阶段不稳定性的发展 (11303 发次)

图 14 是 11297 发次的激光阴影像, 泡沫柱的直径在 -22.6 ns 为 2.54 mm , -15.3 ns 已缩减为 2.31 mm , 在 -6.7 ns 达到 1.48 mm . 泡沫柱出现收缩可能的原因是泡沫在内爆等离子体动压的作用下被压缩. 由于轮廓变化非常明显, 特别是泡沫的边缘较泡沫中心对激光的吸收更强, 证明靠近泡沫表层的材料在不断汇聚到泡沫表面的等离子体所产生动压的作用下不断地被压缩至较小的空间尺寸内. 另外, 泡沫表层不断烧蚀是泡沫柱出现缩减的另一种可能. 要确定泡沫柱直径的缩减具体来自于等离子体撞击形成的压缩还是表面烧蚀, 需获得泡沫柱密度分布情况以及泡沫柱收缩尺寸与泡沫柱质量消融之间的关系, 最佳的诊断途径是使用硬 X 射线源对泡沫辐射区进行背光成像 [24,25]. 当泡沫处于完全电离的条件下, 不透明度降低, 对 $2\text{--}5\text{ keV}$ 的辐射的吸收极弱. 如果密度较低的材料对于背光源是透明的, 那么就可以观察到直径真实的变化情况. 由于本轮实验暂未使用能量高于 2 keV 的硬 X 射线背光成像, 目前尚无法确定泡沫柱的密度分布以及泡沫柱收缩尺寸与泡沫柱质量消融之间的关系.

普通柱形丝阵在滞止阶段 MHD 不稳定性发展情况. 在 X 射线功率峰前后, 不稳定性的特征出现由 $m=0$ 的腊肠不稳定性向 $m=1$ 的扭曲不稳定性的变化, 不稳定性的幅度也出现了明显的增加. 对于动态黑腔负载, 泡沫很好地抑制了不稳定性的继续发展, 使得 MHD 不稳定性在动态黑腔中的发展减弱, 不稳定性的幅度远小于泡沫柱的直径, 且未出现扭曲不稳定的特征. 然而, 泡沫柱在 X 射线峰值后出现一系列较强的发光区域, 出现的位置与滞止阶段开始时未出现钉结构的区域一致, 这些区域的大部分质量参与了内爆, 拖尾质量的份额很少. 在峰后 10 ns , 两种丝阵的拖尾质量已不明显. 可以认为, 虽然泡沫柱能够较好地抑制 bubble-spike 结构所引起的泡沫表层不稳定性扰动及后续模式为 0 和 1 的 MHD 不稳定性发展, 但辐射在泡沫内部并未呈现均匀化的趋势, 能够轻易在滞止泡沫等离子体柱上区分辐射较强区域和较弱区域.

在内爆阶段后期, 不稳定性的幅度得到明显抑制. 图 15(a), (b) 分别是 8 mm 负载和 12 mm 负载在峰值前后的 X 射线分幅像及其对应在 X 射线功率波形上的触发时刻. 由图 15(b) 可知, 直至峰后 19.2 ns , 滞止泡沫等离子体柱仍未出现比较明显的 MHD 不稳定性发展的特征. 图 16 是 10172 发次

图 17 是 11318 和 11309 两发次的针孔像, 针孔板面板采用厚度为 5 mm 的铅板, 并在铅板上开 7 个 $\Phi 1\text{ mm}$ 大孔; 实验时将中心使用在 $\Phi 1\text{ mm}$, 厚度为 $50\text{ }\mu\text{m}$ Ta 片激光打孔获得的 $\Phi 15\text{ }\mu\text{m}$, $\Phi 100\text{ }\mu\text{m}$ 和 $\Phi 300\text{ }\mu\text{m}$ 的针孔贴入铅板上的 $\Phi 1\text{ mm}$ 大孔, 并在针孔前紧贴不同材料、厚度滤片, 滤片的透过率曲线见图 18, 针孔 (1)—(3), (5)—(7) 的物距、相距均为 750 mm , 放大倍数 $M=1$. 针孔 (4) 采用的 $50\text{ }\mu\text{m}$ Ta 滤片由于对 $< 10\text{ keV}$ 的 X 射线的透过率几乎为 0, 本实验中仅起参考作用.

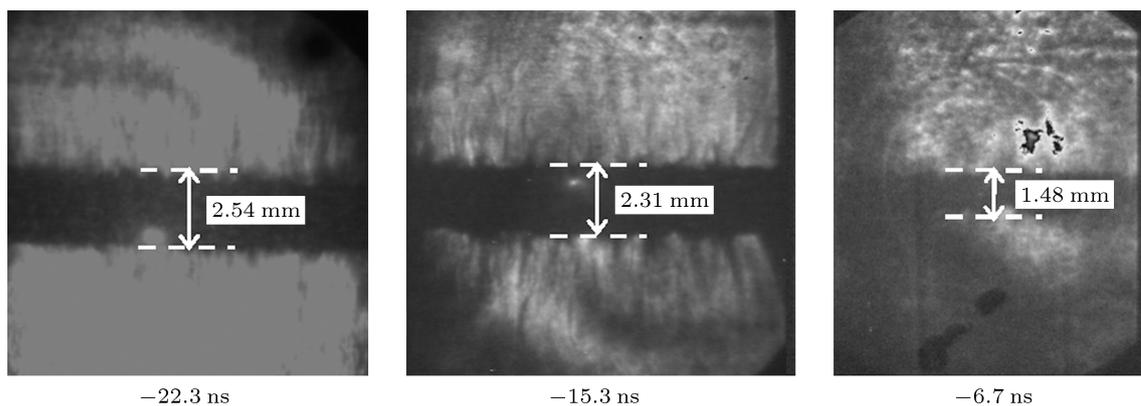


图 14 峰值前泡沫缩减变化 (11297 发次)

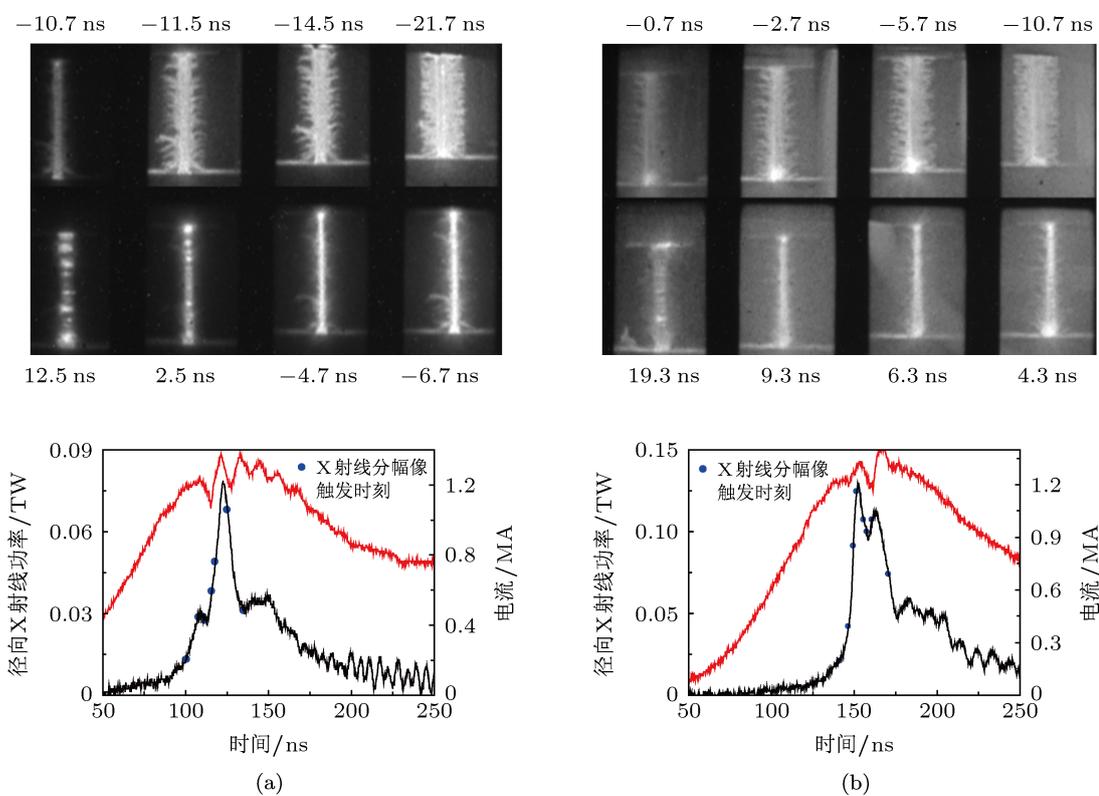


图 15 直径分别为 (a) 8 mm (11318 发次); (b) 12 mm (11309 发次) 负载在峰值前后的 X 射线分幅像及其对应 X 射线功率波形上的触发时刻

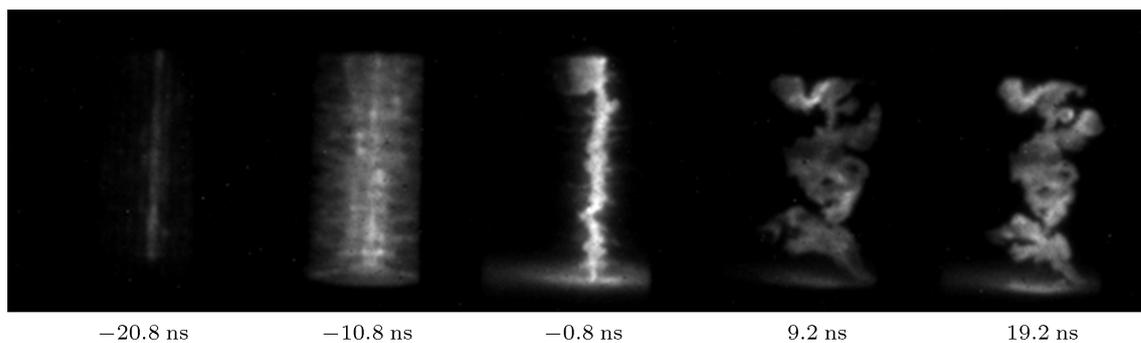


图 16 普通柱形丝阵峰前 20.8 ns 至峰后 19.2 ns 分幅像

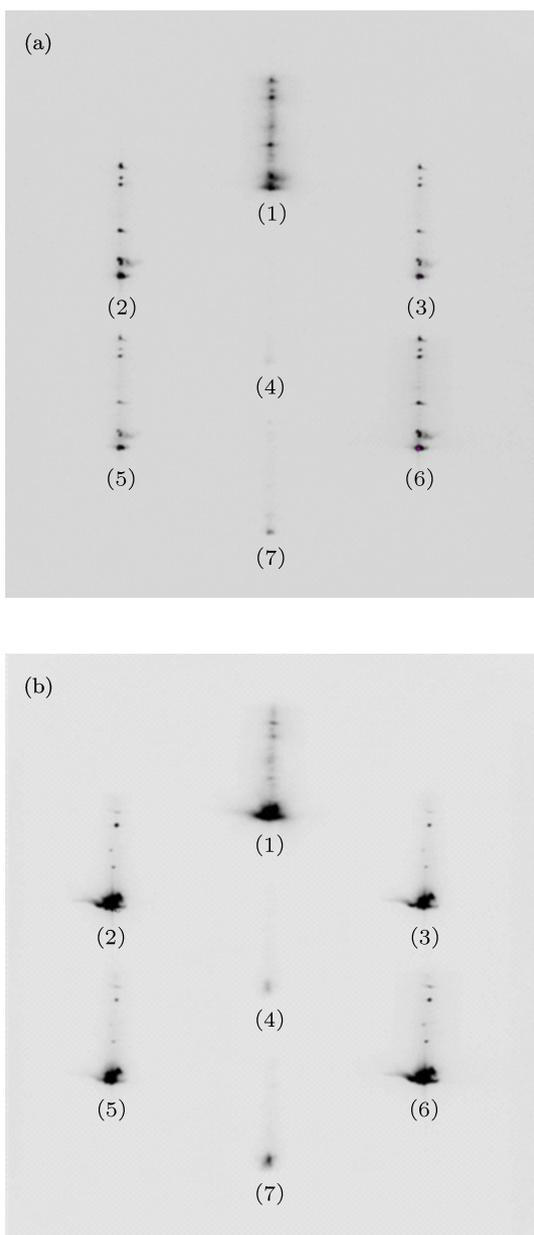


图 17 (a) 8 mm 负载 (11318 发次); (b) 12 mm 负载 (11309 发次) 不同滤片 (1)—(7) 时间积分针孔像 (1) $\Phi 15 \mu\text{m}$; (2) $\Phi 100 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m Al}$ (针孔孔径 + 滤片); (3) $\Phi 100 \mu\text{m} + 15 \mu\text{m Be}$; (4) $\Phi 300 \mu\text{m} + 50 \mu\text{m Ta}$; (5) $\Phi 100 \mu\text{m} + 3 \mu\text{m Al}$; (6) $\Phi 100 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m Ni}$; (7) $\Phi 300 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m Fe}$

在滞止阶段高于 1 keV 的辐射仅离散分布于滞止等离子体中的几处, 并与分幅像出现较强辐射区域位置一致. 与分幅像相同, 不同滤片的针孔像均未出现明显的扭曲不稳定性发展的特征, 低密度泡沫虽未能削弱沿 Z 轴随机分布的等离子体热点, 但很好地控制了角向辐射场的均匀性.

由图 1 可知, 在主峰后有功率第三峰的出现, 为判断该部分辐射是否来自于动态黑腔, 本段进行

一些简要的讨论. 根据 X 射线功率波形, 8 mm 负载和 12 mm 负载功率主峰与第三峰的平均间隔分别为 28.65 ns 和 22.94 ns(见图 19). 通过可见光条纹像判断, 第三峰出现时间已处于内爆等离子体的飞散阶段, 图 15 的分幅像也显示等离子体柱在 X 射线峰后 20 ns 左右已无明显地强辐射区域, 拖尾质量在峰后 10 ns 也已基本消失, 因此可排除拖尾质量二次箍缩形成 X 射线功率峰的可能. 图 20(a) 为 11323 发次多通道 X 射线能谱仪获得的电流, 总 X 射线功率, 405 eV, 440 eV 和 475 eV 三个通道的 X 射线功率与可见光条纹像的时间关系. 在第三峰位置, 三个通道均未出现明显的响应, 推算的辐射温度在峰后 10 ns 也出现了明显的下降, 见图 20(b). 结合上述分析, 可推断 X 射线功率第三峰与动态黑腔的辐射无直接关系. 实验后电极已被严重烧蚀, 如图 21 所示, 电极烧蚀所产生电子束是形成第三峰的可能原因之一.

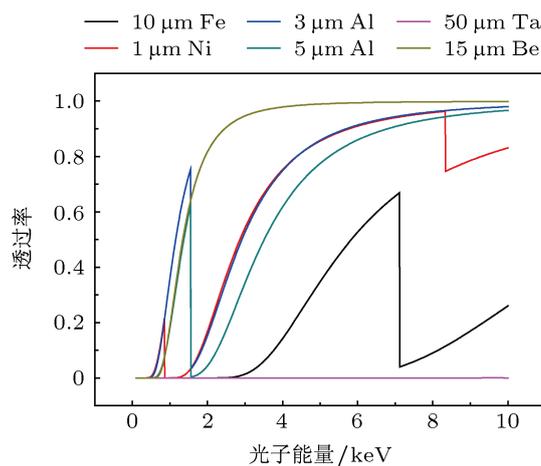


图 18 针孔相机滤片透过率曲线

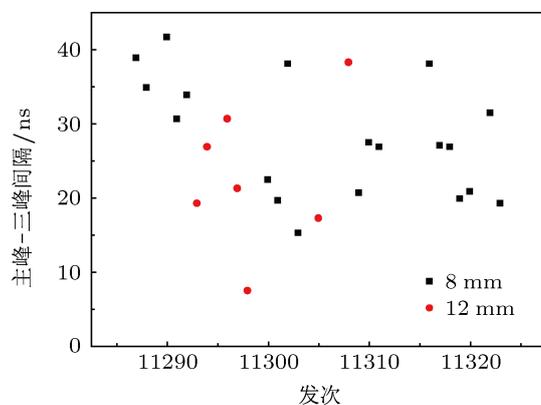


图 19 功率主峰与功率第三峰的时间间隔

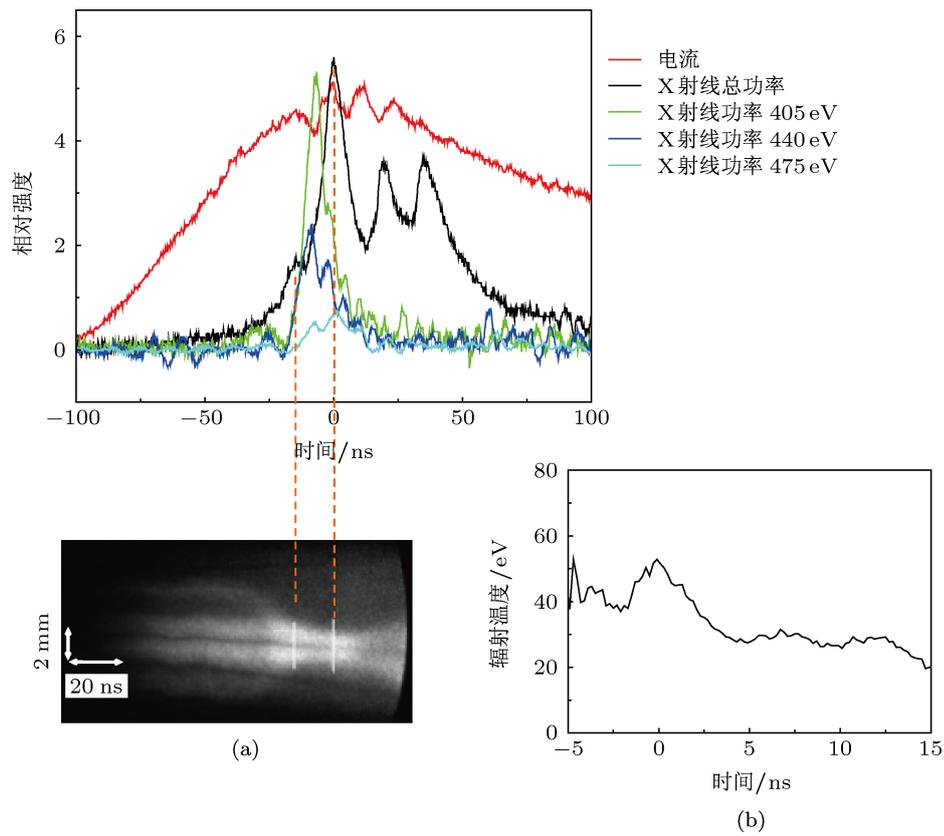


图 20 多通道谱仪实验数据 (a) 电流, 总 X 射线功率, 各通道 X 射线功率波形与可见光条纹像时间关系; (b) 分析得到的辐射温度 (11323 发次)

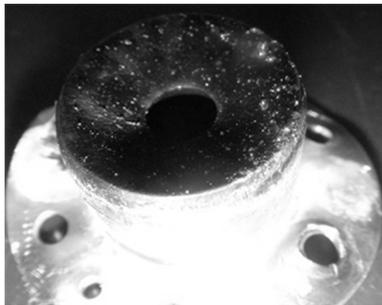


图 21 实验后烧蚀严重的电极

4 结论

使用多套诊断系统获得了动态黑腔内爆的动力学参数、辐射参数和黑腔辐射场图像, 对动态黑腔负载内爆的主要物理过程及动力学、辐射特性开展了较系统的研究. 动态黑腔负载内爆的辐射功率波形呈现双峰结构, 首峰和主峰分别对应于碰撞和滞止过程. 根据实验结果, 8 mm 负载的内爆速度

高于 12 mm 负载, 但其他内爆动力学参数和辐射参数均无明显差异. 动态黑腔区域的能量转化过程以及辐射状态具体与哪些因素有关还需进一步研究. 动态黑腔负载并未出现较大程度的分流, 丝阵消融和内爆过程也未受到泡沫柱的影响, 泡沫柱在丝消融阶段及一直处于比较稳定的状态. 内爆过程中不稳定性扰动的主导波长向长波长方向发展, 形成的 bubble-spike 结构与泡沫黑腔作用使得泡沫柱表层出现类似腊肠不稳定性的特征, 但在泡沫柱的抑制下不稳定性的幅度得到很好的控制, 未深入至泡沫中心区域. 辐射在泡沫内部均匀性较差, 在滞止阶段, 泡沫等离子体柱上辐射较强和较弱区域的区别非常明显. 因此, 如何优化丝阵负载参数降低不稳定性的发展, 进而增强滞止阶段辐射以及改善泡沫柱对能量运输的能力对后续深入开展动态黑腔的研究有着重要的意义.

感谢北京应用物理与计算数学研究所丁宁研究员和肖德龙博士的有益帮助以及提供的 MARED 程序计算结果.

- [1] Smirnov V P, 1991 *Plasma Phys. Control. Fusion* **33** 1697
- [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 1999 *Phys. Plasmas* **6** 2023
- [3] Sanford T W L, Olson R E, Bowers R L, Chandler G A, Derzon M S, Hebron D E, Leeper R J, Mock R C, Nash T J, Peterson D L, Ruggles L E, Simpson W W, Struve K W, Vesey R A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **83** 5511
- [4] Slutz S A, Bailey J E, Chandler G A, Bennett G R, Cooper G J, 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
- [5] Sanford T W L, Nash T J, Olson R E, Bliss D E, Lemke R W, Olson C L, Ruiz C L, Mock R C, Bailey J E, Chandler G A, Cuneo M E, Leeper R J, Matzen M K, Mehlhorn T A, Slutz S A, Stygar W A, Peterson D L, Chrien R E, Watt R E, Roderick N F, Cooper G W, Apruzese J P, Sarkisov G S, Chittenden J P, Haines M G 2004 *Plasma Phys. Control. Fusion* **46** B423
- [6] Sanford T W L, R W Lemke T W L, Mock R C, Chandler G A, Leeper R J, Ruiz C L, Peterson D L, Chrien R E, Idzorek G C, Watt R G, Chittenden J P 2002 *Phys. Plasmas* **9** 3573
- [7] 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
- [8] Haines M G, Sanford T W L, Smirnov V P 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** B1
- [9] Nash T J, Sanford T W L, Mock R C 2007 *Sandia National Laboratories technical report SAND 2007-0992*
- [10] Bailey J E, Chandler G A, Slutz S A, Golovkin I, Lake P W, MacFarlane P W, Mancini R C, Burris-Mog T J, Cooper G, Leeper R J, Mehlhorn T A, Moore T C, Nash T J, Nielsen D S, Ruiz C L, Schroen D G, Varnum W A 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 085002
- [11] Mazarakis M G, Deeney C E, Douglas M R, Stygar W A, Sinars D B, Cuneo M E, Chittenden J, Chandler G A, Nash T J, Struve K W and McDaniel D H 2005 *Plasma Devices and Operations* **3** 157
- [12] Nash T J, Sanford T W L, Mock R C 2007 *Sandia National Laboratories technical report SAND 2007 0992*
- [13] Xu R K, Li Z H, Yang J L, Ding N, Jiang S L, Zhang F Q, Wang Z, Xu Z P, Ning J M, Li L B, Zhou X W, Grabovsky E V, Oleynic G M, Alexandrov V V, Smirnov V P 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 045208 (in Chinese) [徐荣昆, 李正宏, 杨建伦, 丁宁, 周秀文, 蒋世伦, 章法强, 王真, 许泽平, 宁家敏, 李林波, Grabovsky E V, Oleynic G M, Alexandrov V V, Smirnov V P 2011 物理学报 **60** 045208]
- [14] Yang J L, Li Z H, Xu R K, Xu Z P, Ye F, Chen F X, Chen D Y, Qin Y, Xue F B, Hu Q Y, Jiang S Q, Ning J M, Li L B, Zhou L, Zhang F Q, Chen J C, Meng S J, Feng J H 2012 *Proc. Epsicpp 2012* p4.104
- [15] Ding N, Wu J M, Dai Z H, Zhang Y, Yin L, Yao Y Z, Sun S K, Ning C, Shu X J 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 8707 (in Chinese) [丁宁, 邹吉明, 戴自焕, 张扬, 尹丽, 姚彦忠, 孙顺凯, 宁成, 束小建 2010 物理学报 **59** 8707]
- [16] Xu R K, Li Z H, Guo C, Yang J L, Li L B, Song F J, Ning J M, Xia G X, Xu Z P 2003 *Acta. Phys. Sin.* **52** 1203 (in Chinese) [徐荣昆, 李正宏, 郭存, 杨建伦, 李林波, 宋凤军, 宁家敏, 夏广新, 许泽平 2003 物理学报 **52** 1203]
- [17] Xia G X, Zhang F Q, Xu Z P, Xu R K, Chen J C, Ning J M 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 97 (in Chinese) [夏广新, 章法强, 许泽平, 徐荣昆, 陈进川, 宁家敏 2010 物理学报 **59** 97]
- [18] Jiang S Q, Ye Fan, Yang J L, Xia G X, Zhang F Q, Li Z H, Xu R K, Xu Z P, Pan Y J 2012 *Acta. Phys. Sin.* **61** 195205 (in Chinese) [蒋树庆, 叶繁, 杨建伦, 夏广新, 章法强, 李正宏, 徐荣昆, 许泽平, 潘英俊 2012 物理学报 **61** 195205]
- [19] Sanford T W L, Mock R C, Seaman J F, Lopez M R, Watt R G, Idzorek G C, Peterson D L 2005 *Phys. Plasmas* **12** 122701
- [20] Sanford T W L, Nash T J, Mock R C, Apruzese J P, Peterson D L 2006 *Phys. Plasmas* **13** 022701
- [21] Lebedev S V, Chittenden J P, Beg F N, Bland S N, Ciardi A, Ampleford D, Hughes S, Haines M G, Frank A, Blackman E G, Gardiner T 2005 *Plasma Phys. Controlled Fusion* **47** A91
- [22] Haines M G, Lebedev S V, Chittenden J P, Bland S N, Sherlock M, Ampleford D J, Bott S C, Hall G N, Jennings C, Rapley J, Le Pell P D, Coverdale C A, Jones B, Deeney C 2004 *Proc. IAEA FEC 2004 OV/3-5Rb*
- [23] Lebedev S V, Beg F N, Bland S N, Chittenden J P, Dangor A E, Haines M G, Kwek K H, Pikuz S A, Shelkovenko T A 2001 *Phys. Plasmas* **8** 3734
- [24] Zhao T, Zou X B, Zhang R, Wang X X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 1674
- [25] Matzen M K, Sweeney M A, Adams R G, Asay J R, Bailey J E, Bennett G R, Bliss D E, Bloomquist D D, Brunner T A, Campbell R B, Chandler G A, Coverdale C A, Cuneo M E, Davis J P, Deeney C, Desjarlais M P, Donovan G L, Garasi C J, Hail T A, Hall C A, Hanson D L, Hurst M J, Jones B, Knudson M D, Leeper R J, Lemke R W, Mazarakis M G, McDaniel D H, Mehlhorn T A, Nash T J, Olson C L, Porter J L, Rambo P K, Rosenthal S E, Rochau G A, Ruggles L E, Ruiz C L, Sanford T W L, Seaman J F, Sinars D B, Slutz S A, Smith I C, Struve K W, Stygar W A, Vesey R A, Weinbrecht E A, Wenger D F, Yu E P 2005 *Phys. Plasmas* **12** 55503

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

Jiang Shu-Qing[†] Ning Jia-Min Chen Fa-Xin Ye Fan Xue Fei-Biao
Li Lin-Bo Yang Jian-Lun Chen Jin-Chuan Zhou Lin Qin Yi
Li Zheng-Hong Xu Rong-Kun Xu Ze-Ping

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

(Received 10 October 2012; revised manuscript received 25 March 2013)

Abstract

The Z-pinch dynamic hohlraum (ZPDH), as implemented on qiangguang-1 facility at NINT, is composed of an annular tungsten plasma that implodes onto a coaxial foam convertor. The collision between tungsten Z pinch and foam convertor launches a strong shock. The shock generates a strong radiation pulse, referred as the first radiation power peak, then the radiation is trapped by the tungsten Z pinch. As pinch diameter decreases, the second radiation power pulse rises and acts as the main power peak. The radiation and dynamic characteristics do not show obvious difference between the 8 mm and 12 mm wire array configurations. Hence, it is important to notice that the foam reduces the influence of global instability generated by MRT instability on stagnated pinch, especially reduces the growth of $m = 0$ and $m = 1$ MHD instability.

Keywords: ZPDH, foam hohlraum, implosion dynamics, radiation character

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

DOI: 10.7498/aps.62.155203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11135007, 11005096), and the Foundation of Institute of Nuclear Physics and Chemistry of CAEP (Grant No. 2011CX03).

[†] Corresponding author. E-mail: jiangshq@aliyun.com