



·惯性约束聚变物理与技术·

# 负载等离子体扰动对 Z 箍缩动态黑腔辐射温度的影响

刘晓丽, 祁建敏, 褚衍运

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 通过二维辐射流体力学模拟研究了 Z 箍缩动态黑腔负载等离子体撞击泡沫柱的动力学过程, 探索了带扰动负载等离子体形状对黑腔内辐射温度的影响。结果表明, 带有扰动的负载等离子体撞击泡沫后会产生 Rayleigh-Taylor (RT) 流体不稳定性, 导致动态黑腔内的辐射在负载等离子体光薄区域发生漏失, 使黑腔内辐射温度降低; 负载等离子体扰动振幅越大、波长越大, 辐射漏失越严重, 同等动能加载条件下黑腔内辐射温度也越低。

**关键词:** Z 箍缩; 动态黑腔; 等离子体扰动; 辐射漏失; Rayleigh-Taylor 不稳定性

中图分类号: TL62

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220280

## Effect of load plasma disturbance on radiation temperature in Z-pinch dynamic hohlraum

Liu Xiaoli, Qi Jianmin, Chu Yanyun

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

**Abstract:** The dynamic process of load plasma impacting on the foam cylinder was studied by two-dimensional radiation hydrodynamics simulation, and the influence of the shape of load plasma with disturbance on the radiation temperature in dynamic hohlraum was explored. The results show that Rayleigh-Taylor fluid instability will be generated after the disturbed load plasma impacting on the foam, and the development of RT instability will lead to the radiation leakage in the light-thin region of the load plasma, which will reduce the radiation temperature in the dynamic hohlraum. The larger the amplitude and the wavelength of disturbance in the load plasma, the more serious radiation leakage occurs, and the lower the radiation temperature will be in the dynamic hohlraum under the same kinetic energy loading condition.

**Key words:** Z-pinch, dynamic hohlraum, plasma disturbance, radiation leakage, Rayleigh-Taylor instability

聚变能源是一种低碳、绿色、高能量密度的理想能源<sup>[1]</sup>。Z 箍缩动态黑腔是驱动惯性约束聚变的技术途径之一<sup>[2]</sup>, 其基本原理是: Z 方向的数十 MA 大电流流经金属柱形薄套筒或丝阵, 产生磁压强度达百万大气压以上的强洛伦兹力, 推动负载等离子体沿径向高速箍缩内爆, 并以每秒数百公里的速度撞击低密度泡沫柱; 泡沫转换体中产生的强辐射迅速传到泡沫中心并均匀化, 形成辐射温度较高而物质未受扰动的辐射动态黑腔环境, 在冲击波未到达位于轴心的聚变靶丸之前烧蚀压缩靶丸燃料实现聚变点火<sup>[3-5]</sup>。

间接驱动惯性约束聚变的关键因素之一是聚变靶丸周围的辐射场, 动态黑腔能量利用率高, 相比于静态壁黑腔构型和双端真空黑腔构型, 所得到的黑腔辐射温度更高。因此在 Z 箍缩动态黑腔概念提出后, 许多学者在实验和理论上对其展开了较为深入的研究。美国圣地亚实验室采用 20 MA 电流驱动负载, 获得 215 eV 动态黑腔辐射场<sup>[6]</sup>, 相比双端黑腔获得 75 eV<sup>[7]</sup> 和静态黑腔获得的 160 eV<sup>[8]</sup>, 辐射温度分别高出了 187% 和 34%。Rochau<sup>[9]</sup> 等人利用动态黑腔辐射场驱动靶丸内爆获得的中子产额最高可达到  $3.5 \times 10^{11}$ 。美国圣地亚实验室 Slutz 等人利用二维辐射磁流体 LASNEX 程序对 Z 箍缩动态黑腔驱动靶丸内爆进行了一体化模拟, 模拟预测在不考虑负载扰动的情况下的中子产额比实验结果高出 2 倍<sup>[5]</sup>。宁成等人对丝阵采用零维近似、泡沫柱内爆用雪靶近似数值模拟研究了 Z 箍缩驱动动态黑腔形成过程中的基本能量转移特征<sup>[10]</sup>。丁宁等人通过二维磁流体程序研究了 Z 箍缩负载内爆过程中流体不稳定性发展的各个阶段<sup>[11]</sup>。肖德龙等人利用一维辐射磁流体程序 CRHMA 对动态黑腔形成过程和

\* 收稿日期: 2022-09-06; 修订日期: 2023-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11875239, 12135010, 12175207)

联系方式: 刘晓丽, xiaoli\_liu2020@163.com。

关键影响因素开展了数值模拟研究,结果表明丝阵负载等离子体碰撞泡沫前的状态分布决定了动态黑腔辐射场的主要特征,并且动态黑腔辐射场的波形可通过改变负载参数调整获得<sup>[12]</sup>;肖德龙、丁宁等人利用二维辐射磁流体 MARED 程序数值模拟研究了 Z 箍缩动态黑腔驱动靶丸内爆动力学过程,获得了负载等离子体与泡沫转换体相互作用、冲击波的产生、黑腔辐射输运及靶丸烧蚀压缩内爆的完整过程<sup>[13]</sup>。然而, Z 箍缩负载等离子体在内爆过程中由于磁流体不稳定性,在与泡沫柱碰撞前带有大量的扰动<sup>[14-16]</sup>,对动态黑腔的性能和品质产生不利影响。段耀勇等人利用二维磁流体程序对钨(W)丝阵内爆过程中流体不稳定性的演化开展了数值模拟研究,分析了存在不稳定性与无不稳定性条件下等离子体内爆的差异,研究了不同初始密度扰动对 X 射线输出功率和能量的影响<sup>[17]</sup>。王冠琼等人研究了轴向磁场对磁化圆柱形箔套筒负载早期不稳定性的影响<sup>[18]</sup>。负载在内爆过程中因流体不稳定性难以形成均匀的负载等离子体,带有扰动的负载等离子体撞击泡沫柱后,黑腔内的辐射可能会从负载等离子体光薄区域漏失导致黑腔内辐射温度降低,辐射温度的降低将会对聚变点火带来不利影响。

Z 箍缩动态黑腔驱动靶丸内爆物理过程非常复杂,包括丝阵/套筒通入电流后融化电离形成等离子体,等离子体在电磁力作用下内爆加速,高速等离子体撞击泡沫产生辐射热波,辐射热波到达靶丸处烧蚀靶丸驱动靶丸内爆等物理过程。要通过数值模拟方式实现全物理过程比较困难,不仅要建立辐射磁流体动力学模型,而且需要比较精确的状态方程、辐射不透明度以及电阻率参数,目前公开文献仅有美国的 LASNEX<sup>[5]</sup> 程序以及北京应用物理与计算数学研究所的 MRAED 程序<sup>[13]</sup> 能够实现全过程一体化模拟。但也存在温稠密阶段状态方程参数不够精确以及辐射输运模型简化等问题。加入磁扩散方程后的 MULTI2D 程序<sup>[19]</sup> 采用单温单群辐射扩散近似,也能够模拟动态黑腔形成过程,但调试过程复杂,而且模型过于简化。考虑到高速等离子体撞击泡沫过程时间比较短,而且处于通入电流脉冲的下降沿,磁压相对负载等离子体撞击所产生的冲击波强度是小量<sup>[20-21]</sup>,以 Z 装置和 PTS 装置的实验电流和实验参数为例,在负载碰撞泡沫转换体时刻冲击压力与磁压的比值分别为 28 和 23<sup>[21]</sup>,因此本文在负载等离子体撞击泡沫产生辐射以及辐射烧蚀靶丸过程中不考虑电磁力的作用。本文通过二维辐射流体力学以动能加载方式研究了带扰动负载等离子体碰撞泡沫柱的动力学过程,探索了不同扰动振幅和不同扰动波长对动态黑腔辐射温度的影响,并分析和讨论动态黑腔内产生辐射漏失的相关机理。

## 1 负载等离子体撞击泡沫柱动力学过程

### 1.1 辐射流体力学模拟模型

本文使用芝加哥大学开发的 FLASH 程序<sup>[22]</sup> 作为数值模拟工具,以动能加载方式研究不同形态的负载等离子体碰撞泡沫柱的动力学过程。FLASH 程序在高能量密度物理模块已通过了大量的验证并具备模拟实验的能力<sup>[23-25]</sup>,其采用有限体积方法,自适应欧拉网格技术,电子组分和离子组分以及辐射分别采用不同的温度描述,辐射输运过程采用多群扩散近似(理论上光子分群越多越精确,但是 20 群和 100 群模拟的动态黑腔辐射温度差别不大<sup>[21]</sup>,因此模拟使用 20 群)。模拟所使用的状态方程由 FEOS 程序<sup>[26]</sup> 计算得到,辐射不透明度由 SNOOP 程序<sup>[27]</sup> 计算得到。由于在负载等离子体碰撞泡沫柱后的阶段,磁压相对于负载等离子体撞击泡沫所产生的冲击压力是小量<sup>[20-21]</sup>,因此模拟不考虑磁压的作用。辐射流体模块主要采用单流体三温多群扩散近似,涉及的主要控制方程如下

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\rho) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\mathbf{u}\rho)}{\partial t} = -\nabla \cdot (p_i + p_e + p_r) - \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}\rho) \quad (2)$$

$$\frac{\partial (e_i \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\rho e_i) + p_i \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \frac{C_{v,e}}{\tau_{ei}} (T_e - T_i) \quad (3)$$

$$\frac{\partial (e_e \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\rho e_e) + p_e \nabla \cdot \mathbf{u} = \rho \frac{C_{v,e}}{\tau_{ei}} (T_i - T_e) - \nabla \cdot \mathbf{q}_e - Q_e + Q_a + q_{e,r} \quad (4)$$

$$\frac{\partial (e_r \rho)}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\rho e_r) = -\nabla \cdot \mathbf{q}_r + Q_e - Q_a \quad (5)$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial e_g}{\partial t} - \nabla \cdot \frac{1}{3\sigma_{lg}} \nabla e_g + \sigma_{ag} e_g = \frac{4\pi}{c} \sigma_{eg} \int_{\nu_g}^{\nu_{g+1}} B_\nu d\nu \quad (6)$$

式(1)至式(5)分别为质量连续方程、动量方程、离子能量方程、电子能量方程、辐射能量方程,其中: $\rho$ 是密度, $\mathbf{u}$ 是速度, $p_e$ 、 $p_i$ 、 $p_r$ 分别是电子压力、离子压力、辐射压力, $e_e$ 、 $e_i$ 、 $e_r$ 分别是电子比内能、离子比内能、辐射比内能, $C_{v,e}$ 是电子热容, $\tau_{ei}$ 是电子和离子相互作用的弛豫时间, $T_e$ 、 $T_i$ 分别表示电子和离子的温度, $q_e$ 、 $q_r$ 分别是电子能流和

辐射能流,  $Q_e$ 、 $Q_a$ 分别表示单位时间单位体积电子释放的辐射能以及电子吸收的辐射能,  $q_{ex}$ 是电子吸收的其他热源能量。式(6)是采用多群扩散近似的辐射输运方程, 其中 $e_g$ 是辐射能量密度,  $\sigma_{tg}, \sigma_{ag}, \sigma_{eg}$ 分别是第  $g$  群光子的 Rossland 辐射不透明度、Plank 吸收不透明度和辐射不透明度, 可以通过 SNOP 程序计算得到,  $B_g$ 是黑体辐射强度。辐射能量方程中的辐射能流项、电子辐射能项和吸收能项可以使用式(6)得到, 式(6)中的电子辐射项和吸收项对应式(6)中右侧项和左侧第三项。在已知状态方程和辐射不透明度的情况下, 方程组可以封闭求解。

模拟模型如图 1 所示, Z 箍缩动态黑腔负载高度  $z$  为 1 cm, 负载钨等离子体壳层密度为  $0.05 \text{ g/cm}^3$ 、厚度为  $0.04 \text{ cm}$ 、速度为  $5 \times 10^7 \text{ cm/s}$ 、动能为  $8.78 \times 10^5 \text{ J}$ , CH 泡沫辐射转换体密度为  $0.01 \text{ g/cm}^3$ 、半径  $r$  为  $0.5 \text{ cm}$ 。泡沫柱中心设置一个外半径为  $0.1 \text{ cm}$ 、内半径为  $0.08 \text{ cm}$  的空心 Be 靶丸。数值模拟采用二维柱坐标, 左边界设置为流体以及辐射输运的对称边界条件, 右侧设置为自由流体边界条件和真空辐射边界条件。

### 1.2 负载等离子体撞击泡沫柱动力学过程

图 2 给出了模拟过程中  $t=3 \text{ ns}$  时刻、柱形黑腔高度  $z=0.3 \text{ cm}$  处辐射温度和压力的径向分布。3 ns 时刻, W 等离子体撞击泡沫后在 W 和泡沫柱中产生冲击波, 由于 W 等离子体的密度和辐射不透明度较大, 冲击波在高温泡沫和 W 等离子体中产生的辐射, 大部分被封闭在 W 等离子体所包围的动态黑腔内。泡沫柱的密度和辐射不透明度较小, 冲击波波后的高温泡沫释放的辐射以辐射热波形式在泡沫柱中进行传播。从图中可以看出, 辐射热波在冲击波前方, 辐射热波比冲击波更快到达靶。Z 箍缩动态黑腔便是利用此原理, 在冲击波到达中心聚变靶丸前, 辐射烧蚀驱动聚变靶丸进行内爆, 从而实现聚变点火。

图 3 给出了负载等离子体撞击泡沫柱后, 柱形黑腔内半径  $r=0.2 \text{ cm}$  处辐射温度的演化图。从图 3 中可以明显看出, 在黑腔内诊断点处辐射温度的变化可以分为三个阶段: 第一个阶段是辐射热波到达诊断点之前, 辐射温度分布如图 4(a) 所示; 第二阶段是辐射热波前到达诊断点, 辐射温度分布如图 4(b) 所示; 第三个阶段是辐射热波完全经过诊断点之后, 动态黑腔由于负载等离子体不断向轴心运动而体积缩小过程, 辐射温度分布如图 4(c) 和 4(d) 所示。负载等离子体撞击泡沫柱后产生冲击波, 冲击波加热泡沫到高温, 高温泡沫产生大量辐射。泡沫柱相对部分高能辐射是透明的, 这部分高能辐射以光速直接到达诊断点导致诊断辐射温度升高, 因此第一阶段辐射温度的升高是由于高能辐射直接穿透泡沫柱导致。高温泡沫产生的大部分辐射并不能直接穿透泡沫, 而是以辐射热波形式在泡沫柱中进行传播, 由于不同能量的辐射所形成的辐射热波传播速度不一样, 辐射热波的温度剖面并不是一个陡峭的波阵面, 而是带有一定的斜度, 因此第二阶段辐射热波波头到达诊断点后诊断点处的辐射温度快速升高。随着负载等离子体撞击泡沫所产生的冲击波不断向轴心传播, 被冲击波加热的泡沫越来越多。同时, 随着负

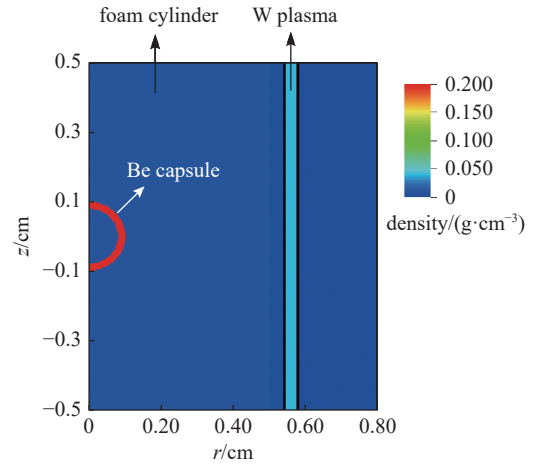


Fig. 1 Schematic diagram of simulation of loaded plasma impinging on foam

图 1 负载等离子体撞击泡沫模拟示意图

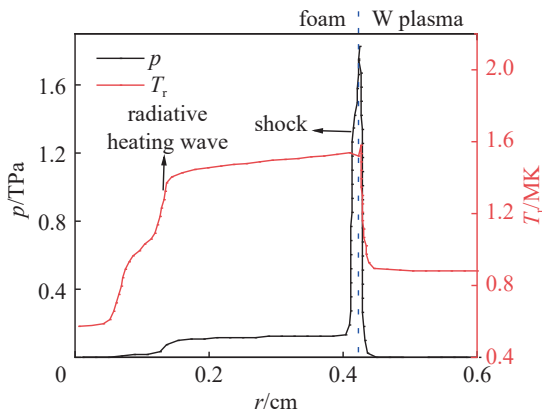


Fig. 2 Radial distribution diagram of pressure ( $p$ ) and radiation temperature ( $T_r$ ) at  $t=3 \text{ ns}$  and  $z=0.3 \text{ cm}$

图 2  $t=3 \text{ ns}$  时刻, 高度  $z=0.3 \text{ cm}$  处的压强 ( $p$ ) 和辐射温度 ( $T_r$ ) 的径向分布图

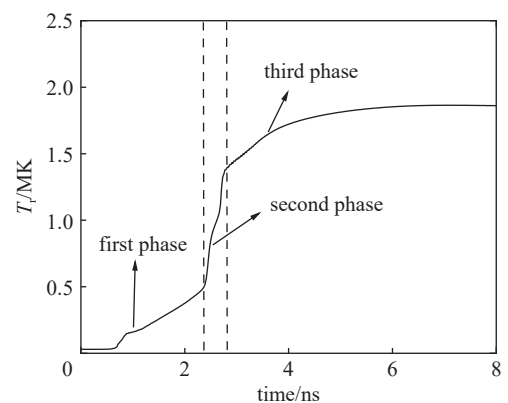


Fig. 3 Evolution diagram of radiation temperature ( $T_r$ ) in dynamic hohlraum at  $z=0.3 \text{ cm}$  and  $r=0.2 \text{ cm}$

图 3  $z=0.3 \text{ cm}$ 、 $r=0.2 \text{ cm}$  处动态黑腔内辐射温度 ( $T_r$ ) 演化图



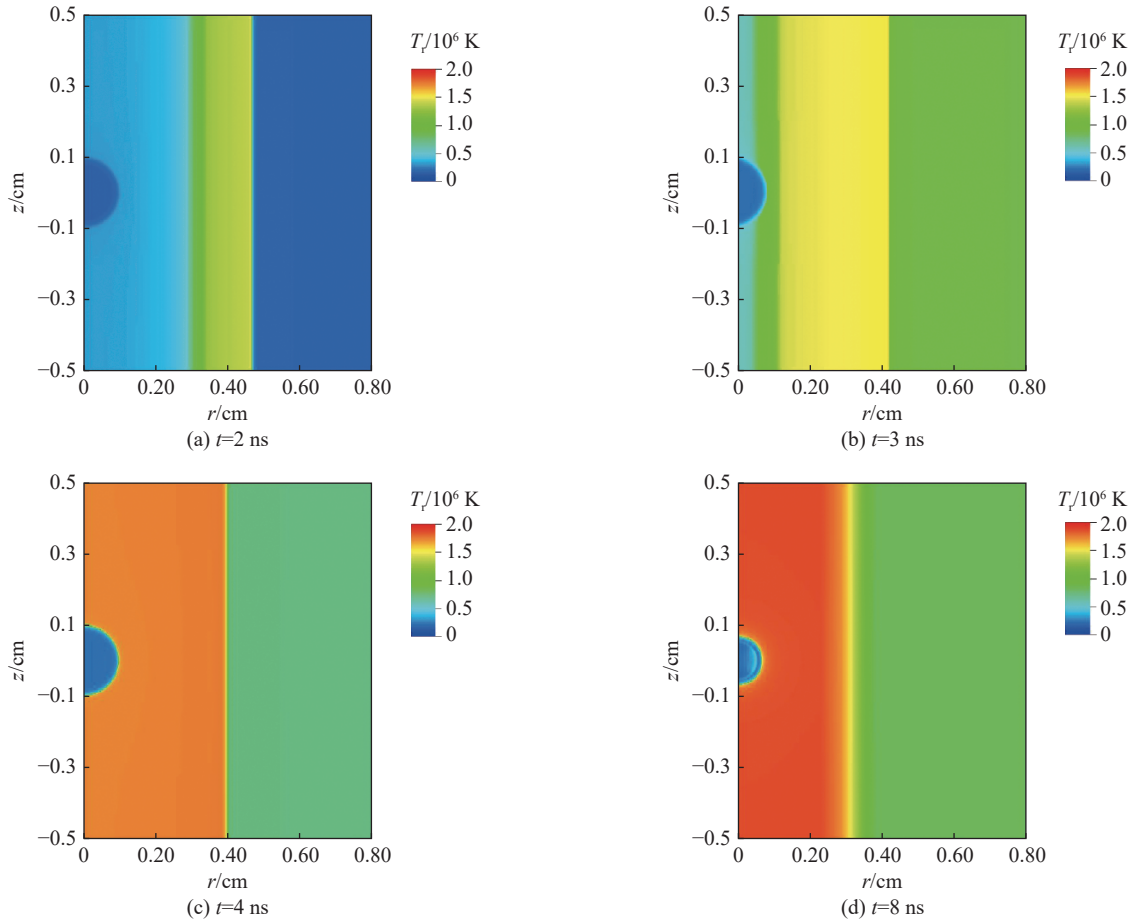


Fig. 4 Distribution cloud diagram of radiation temperature (K) at different time ( $t$ ) after W plasma impinging on foam column

图 4 W 等离子体撞击泡沫柱后不同时刻辐射温度 (K) 分布云图

载等离子体不断向轴心运动, 动态黑腔的体积不断的缩小, 因此第三阶段黑腔内的辐射温度逐渐增大。

负载等离子体在磁驱动内爆过程中, 由于磁流体不稳定性影响, 在撞击泡沫前并不是平整的, 而是存在大量扰动, 也就是说, 负载等离子体不可能以相同的速度同时到达泡沫柱表面。负载等离子体撞击泡沫柱后, 泡沫加速, 负载等离子体减速, 负载等离子体密度一般大于泡沫柱密度, 因此会发生轻物质减速重物质现象, 即引起瑞利-泰勒(RT)不稳定性发展。图 5 给出了 4 ns 时刻, 在  $z=0.3$  cm 截面负载等离子体撞击泡沫柱后的压力和密度分布图。图中蓝色虚线表示负载等离子体和泡沫的物质分界面, 负载等离子体碰撞泡沫后分别在泡沫柱和负载等离子体内各产生一个冲击波。负载等离子体内的冲击波到达负载等离子体自由界面后反射一个向轴心传播的稀疏波, 稀疏波的卸载作用使负载等离子体压力降低, 从而导致泡沫和负载等离子体的压力梯度小于 0, 而密度梯度大于 0, 也就是  $\nabla p \cdot \nabla \rho < 0$ , 这种情况会触发 RT 不稳定性, 从而会导致负载等离子体上的扰动进一步发展。

## 2 负载扰动对辐射温度的影响

如果负载等离子体上存在扰动, 扰动会由于 RT 不稳定性而发展, 因此不同形状的扰动对黑腔内辐射温度的影响规律可能不一致。对带有不同振幅和波长扰动的 W 负载等离子体撞击 CH 泡沫柱后的动力学过程进行数值模拟。Z 轴缩动态黑腔模拟结构如图 6 所示, 几何结构和图 1 一致, 唯一区别是在 W 等离子体上预制不同形态的扰动。

### 2.1 扰动振幅对黑腔内辐射温度的影响

在 W 负载等离子体上设置波长  $\lambda = 0.1$  cm, 振幅  $A$  分别为 0 cm (无扰动)、0.01 cm、0.02 cm 和 0.03 cm 的正弦扰动,

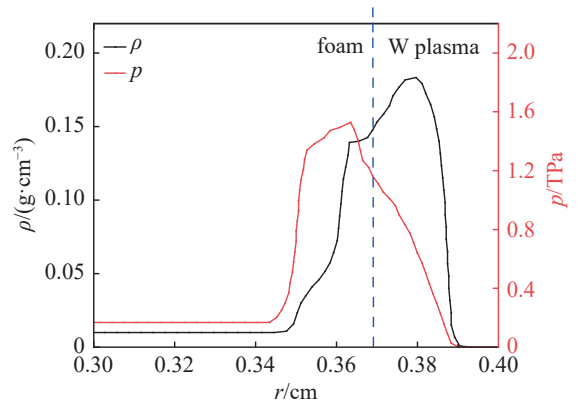


Fig. 5 Radial distribution of pressure and density at time  $t=4.5$  ns and height  $z=0.3$  cm)

图 5 在  $t=4.5$  ns 时刻, 高度  $z=0.3$  cm 处压强和密度径向分布

研究带有扰动负载等离子体碰撞泡沫柱后，初始扰动对黑腔内辐射温度的影响。

图 7 给出了不同扰动振幅时，负载等离子体撞击泡沫柱后，黑腔内半径  $r=0.2$  cm 处辐射温度的演化。从图中可以明显看出，在不同时刻，扰动振幅  $A$  越大，黑腔内辐射温度越低。扰动振幅分别为 0 cm (无扰动)、0.01 cm、0.02 cm 和 0.03 cm 时，黑腔内最大辐射温度分别为  $1.86 \times 10^6$  K、 $1.71 \times 10^6$  K、 $1.52 \times 10^6$  K 和  $1.41 \times 10^6$  K。相对于无扰动情况，扰动振幅为 0.03 cm 时黑腔内最大辐射温度降低 20% 以上。说明扰动振幅对黑腔内辐射温度存在明显影响。

图 8 给出了  $t=5$  ns 时刻，不同初始扰动振幅下，密度分布云图，图中黑色实线表示 W 负载等离子体分界面。由图 8 可见出，5 ns 时刻，初始振幅  $A$  越大，负载等离子体凸出到泡沫中的尖钉越长，尖钉处负载等离子体密度较大，

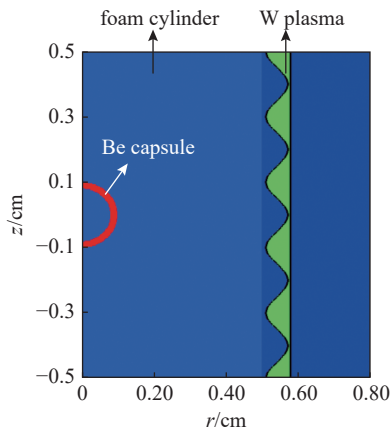


Fig. 6 Schematic diagram of load plasma with disturbance impacting foam

图 6 带扰动的负载撞击泡沫模拟示意图

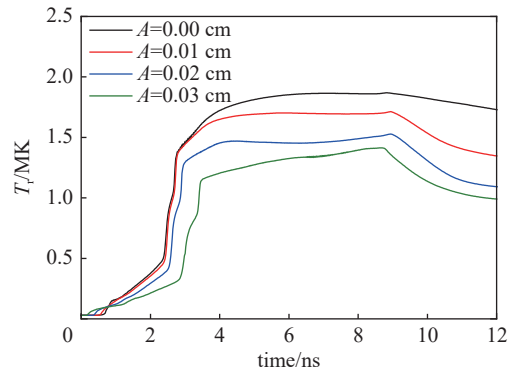


Fig. 7 Radiation temperature ( $T_r$ ) evolution in a dynamic hohlraum under different perturbation amplitudes on load

图 7 负载上不同扰动振幅下动态黑腔内的辐射温度 ( $T_r$ ) 演化

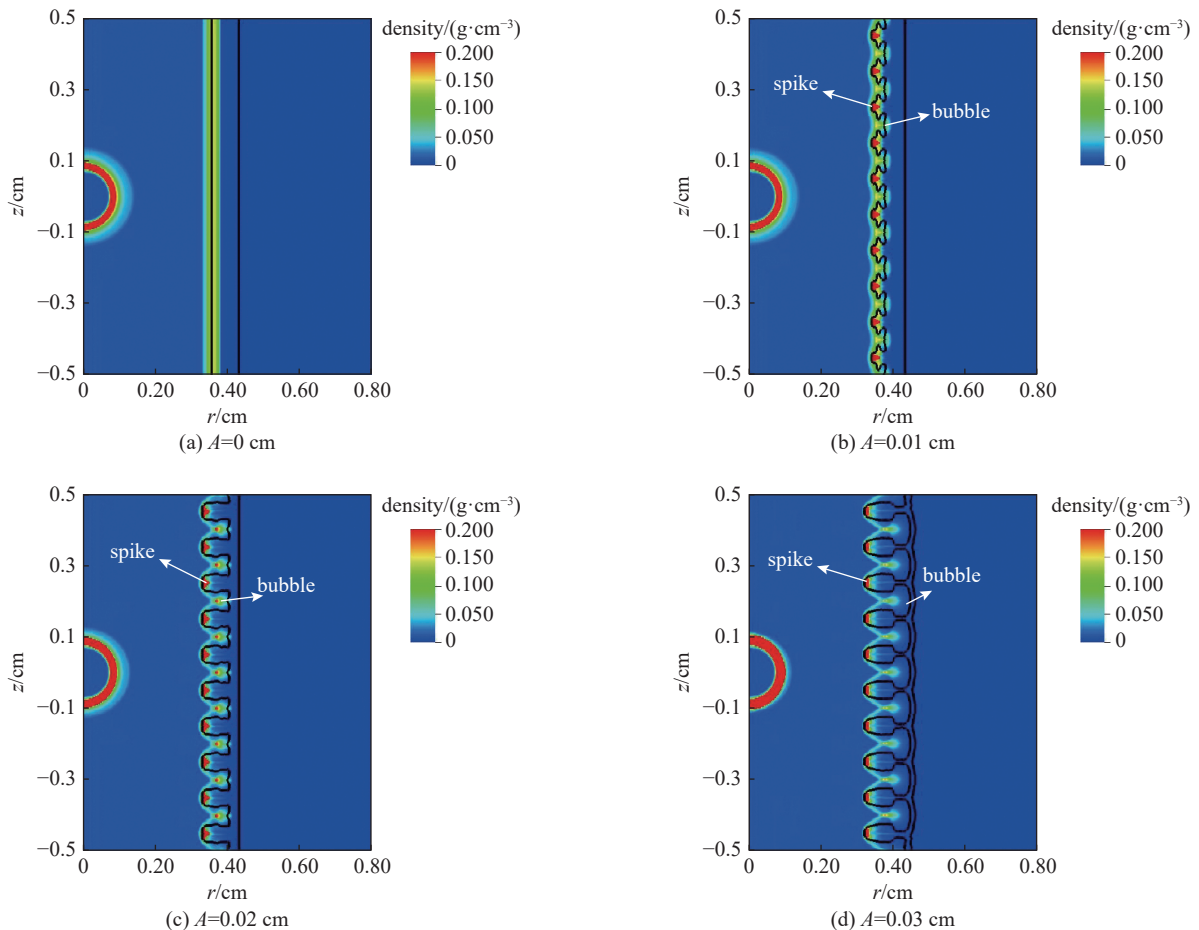


Fig. 8 Cloud image of density distribution under different initial disturbance amplitudes ( $A$ ) at time  $t=5$  ns

图 8  $t=5$  ns 时刻不同初始扰动振幅 ( $A$ ) 下密度分布云图

而气泡凹陷处密度较低,这部分低密度区域对应负载等离子体的光薄区域,也是辐射漏失的主要区域。图 9 给出了  $t=5$  ns 时刻,不同初始扰动振幅下辐射温度 ( $T_r$ ) 分布云图,从图中可以明显看出,在气泡处的辐射温度要明显高于尖钉处的辐射温度,说明气泡处的确存在辐射漏失现象,而且初始扰动振幅  $A$  越大气泡处辐射温度  $T_r$  越高,辐射漏失现象越严重。

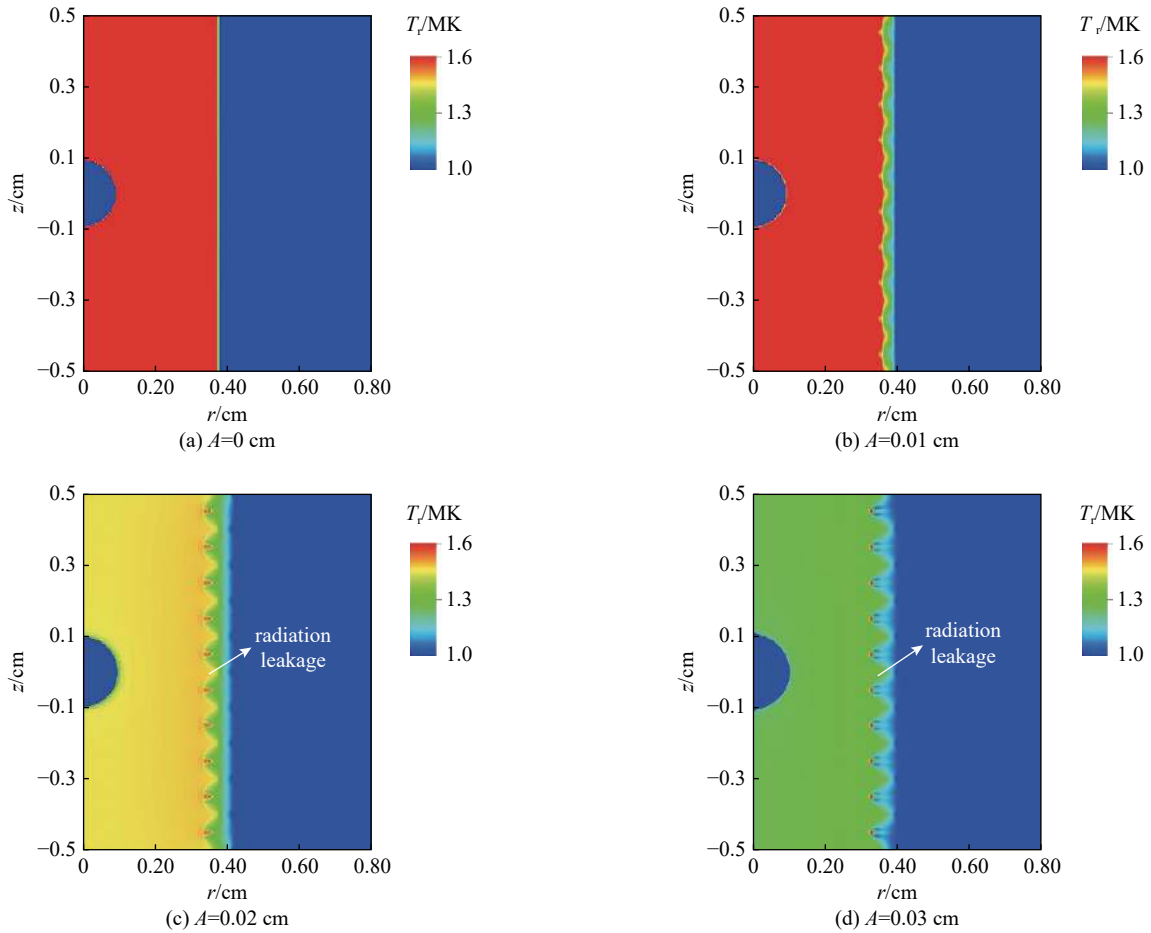


Fig. 9 Radiative temperature ( $T_r$ ) distribution cloud at time  $t=5$  ns with different initial disturbance amplitudes

图 9  $t=5$  ns 时刻不同初始扰动振幅 ( $A$ ) 下辐射温度 ( $T_r$ ) 分布云图

带有扰动的负载等离子体撞击泡沫后,由于 RT 不稳定性的发展,初始扰动振幅越大,RT 不稳定性的种子越大,导致 RT 不稳定性所形成的负载等离子体气泡处辐射漏失越严重,因此在负载磁内爆过程中要尽量抑制流体不稳定性,以减小负载等离子体撞击泡沫前的扰动种子。

## 2.2 扰动波长对辐射温度的影响

在 W 负载等离子体上设置振幅  $A$  为 0.03 cm,扰动波长  $\lambda$  分别为 0.2 cm、0.1 cm 和 0.06 cm 下的正弦扰动,研究扰动波长对带有扰动的负载等离子体碰撞泡沫柱后的动力学过程的影响。图 10 给出了不同扰动波长时,负载等离子体撞击泡沫柱后,黑腔内  $r=0.1$  cm 处辐射温度的演化图。从图中可以看出,在第一阶段和第二阶段,波长越大辐射温度越高。而在第三阶段,也就是辐射热波到达轴心、动态黑腔体积不断缩小阶段,初始扰动波长越短,黑腔内辐射温度增长越快。在 11 ns 时刻扰动波长  $\lambda$  分别为 0.2 cm、0.1 cm 和 0.06 cm 时黑腔内最大辐射温度分别为  $1.63 \times 10^6$  K、 $1.84 \times 10^6$  K 和  $2.2 \times 10^6$  K。

图 11 给出了振幅为 0.03 cm,初始波长分别为 0.2 cm(左

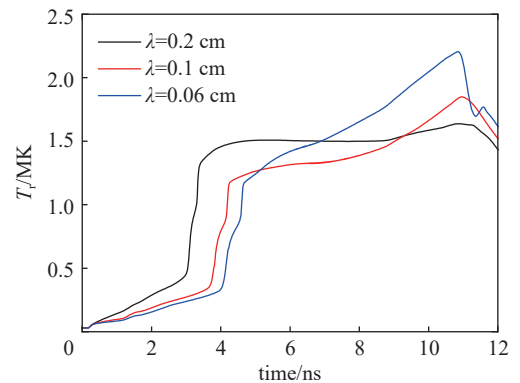


Fig. 10 Radiation temperature evolution of dynamic hohlraum under different disturbance wavelengths ( $\lambda$ ) on load

图 10 负载上不同扰动波长 ( $\lambda$ ) 下动态黑腔辐射温度演化 ( $r=0.1$  cm)

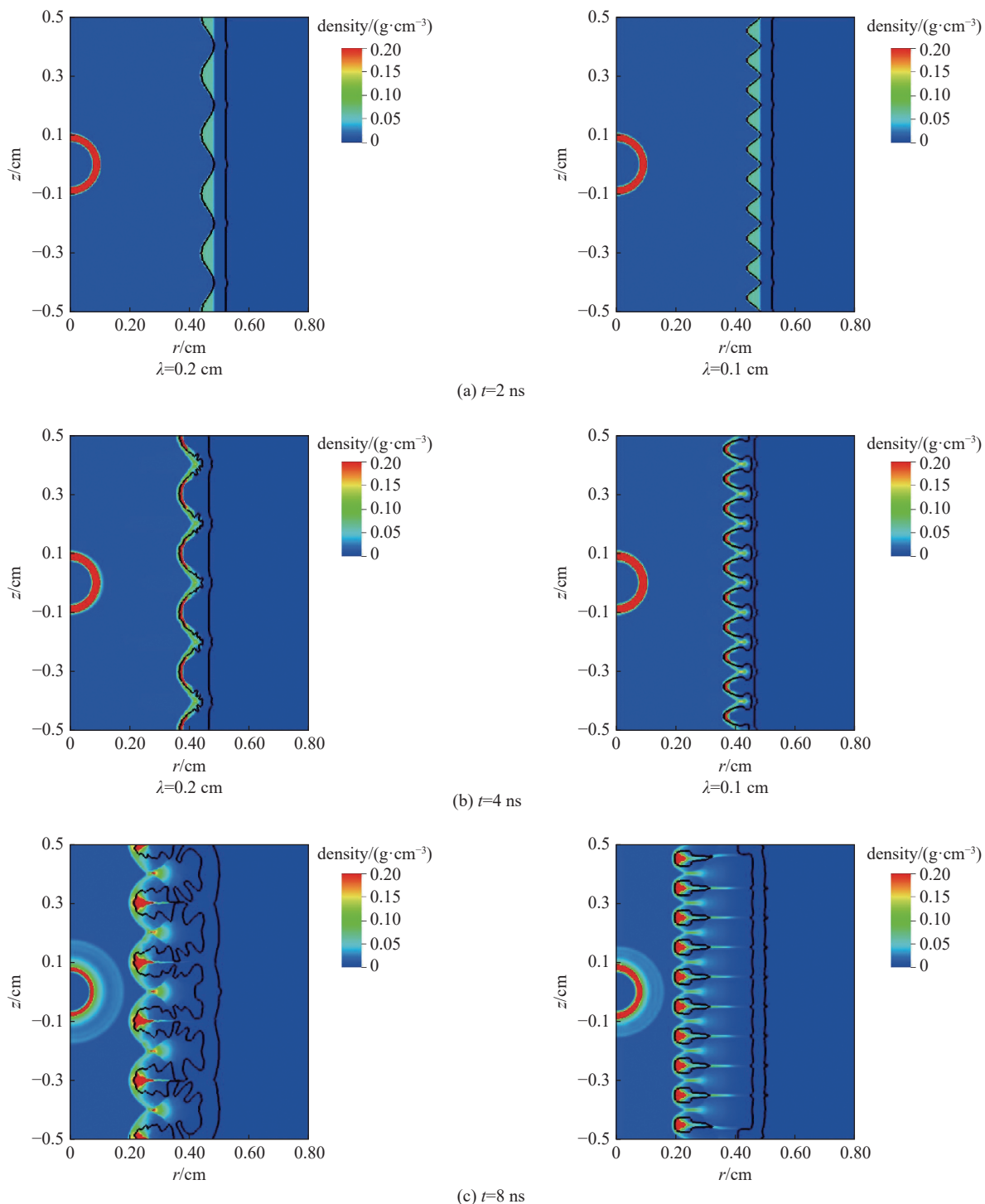


Fig. 11 Density contour at different time under disturbance wavelengths  $\lambda = 0.2$  cm and  $\lambda = 0.1$  cm on load

图 11 波长分别为 0.2 cm 和 0.1 cm 不同时刻下密度云图

侧)和 0.1 cm(右侧)密度云图,图中黑色实线是 W 负载等离子体界面。从图中可以看出,在 4 ns 之前,初始波长 0.2 cm 的扰动界面发展要比初始波长 0.1 cm 的要慢,这是由于在界面扰动振幅小于波长时,RT 不稳定性处于线性增长阶段,这时界面扰动振幅增长率 $\gamma$ 与扰动波长 $\lambda$ 存在关系: $\gamma \sim \sqrt{1/\lambda}$ <sup>[28]</sup>,也就是波长 $\lambda$ 越大,RT 不稳定性线性增长率 $\gamma$ 越小,因此在 RT 不稳定性的线性阶段波长越大辐射漏失越少,这也解释了在第一阶段和第二阶段初始扰动波长较大黑腔内辐射温度反而越高。而在界面扰动增长到与扰动波长差不多状态时,RT 不稳定性增长处于饱和状态。波长较大的扰动其线性增长时间长,界面扰动所能达到的振幅也越大,而波长较短的扰动较早进入饱和增长状态,扰动甚至在 Z 方向发展。因此在负载等离子体不断向轴心运动,动态黑腔体积不断缩小的第三阶段,初始波长较大时,界面扰动由于 RT 不稳定性发展比较充分,辐射漏失现象反而更严重,从而导致第三阶段辐射温度升高



慢,辐射温度反而较低。

图 12 给出了波长分别为 0.2 cm(左侧图)和 0.06 cm(右侧图)不同时刻下辐射温度  $T_r$  云图,从图中可以明显看出,相对于扰动波长  $\lambda=0.06$  cm,负载等离子体扰动波长  $\lambda=0.2$  cm 时的辐射漏失现象更加严重,在 8 ns 时刻以及 10 ns 时刻黑腔内辐射温度要显著较低。因此在负载等离子体磁内爆加速阶段,也需要着重控制波长较大的扰动,避免较大波长扰动在负载等离子体撞击泡沫柱后充分发展而导致黑腔内辐射大量漏失。

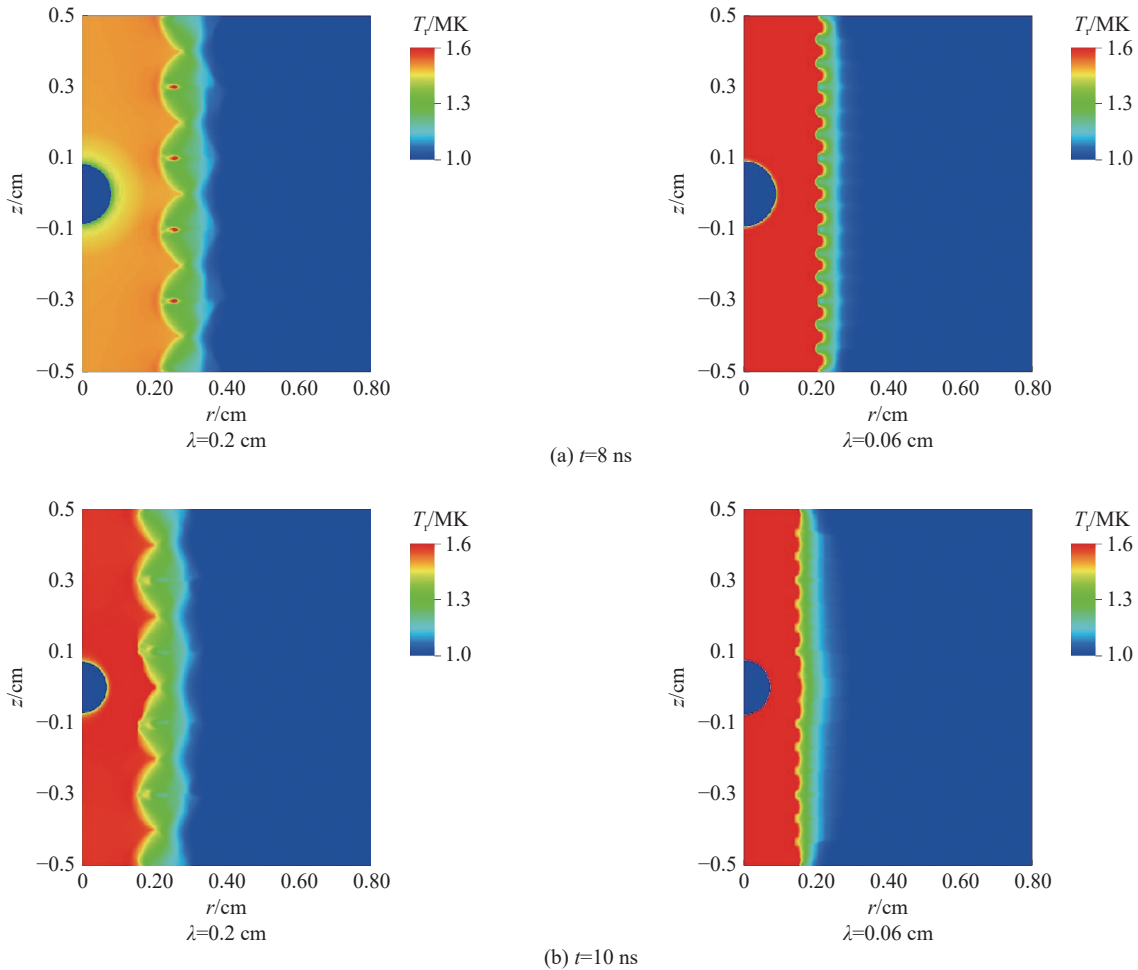


Fig. 12 Radiative temperature ( $T_r$ ) distribution cloud at different time under disturbance wavelengths  $\lambda=0.2$  cm and  $\lambda=0.06$  cm on load plasma

图 12 波长分别为  $\lambda=0.2$  cm 和  $\lambda=0.06$  cm 不同时刻下辐射温度云图

### 3 结论

本文采用二维辐射流体力学模型模拟研究了 Z 箍缩内爆等离子体动能加载泡沫辐射转换体形成动态黑腔的动力学过程。研究表明:负载等离子体撞击泡沫柱后存在 RT 流体不稳定性,而且 RT 流体不稳定性会放大负载等离子体上的扰动。相同质量和动能的负载等离子体撞击相同泡沫柱时,负载等离子体上扰动振幅越大、波长越大,动态黑腔内辐射漏失越严重,黑腔内辐射温度越低。因此在负载等离子体磁内爆加速阶段,不仅需要控制扰动振幅,也需要控制波长,避免较大波长和较大振幅扰动在负载等离子体撞击泡沫柱后的发展而导致黑腔内辐射大量漏失。由于本文研究未考虑磁场作用,计划下一步工作中,在辐射流体力学模型中加入负载等离子体磁内爆的零维近似模型,对负载等离子体扰动发展过程进行研究。

#### 参考文献:

- [1] 杜祥琬,叶奇蓁,徐铄,等.核能技术方向研究及发展路线图[J].中国工程科学,2018,20(3):17-24.(Du Xiangwan, Ye Qizhen, Xu Mi, et al. Research on technology directions and development roadmap of nuclear energy[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 17-24)
- [2] 彭先觉,王真. Z 箍缩驱动聚变-裂变混合能源堆总体概念研究[J].强激光与粒子束,2014,26: 090201.(Peng Xianjue, Wang Zhen. Conceptual research on Z-pinch driven fusion-fission hybrid reactor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 090201)



- [3] 彭先觉, 刘成安, 师学明. 核能未来与Z箍缩驱动聚变裂变混合堆[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019. (Peng Xianjue, Liu Cheng'an, Shi Xueming. Nuclear energy future and Z-pinch driven fusion fission hybrid reactor[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019)
- [4] Slutz S A, Bailey J E, Chandler G A, et al. Dynamic hohlraum driven inertial fusion capsules[J]. *Physics of Plasmas*, 2003, 10(5): 1875-1882.
- [5] Slutz S A, Peterson K J, Vesey R A, et al. Integrated two-dimensional simulations of dynamic hohlraum driven inertial fusion capsule implosions[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13: 102701.
- [6] Sanford T W L, Lemke R W, Mock R C, et al. Dynamics and characteristics of a 215-eV dynamic-hohlraum X-ray source on Z[J]. *Physics of Plasmas*, 2002, 9(8): 3573-3594.
- [7] Bennett G R, Cuneo M E, Vesey R A, et al. Symmetric inertial-confinement-fusion-capsule implosions in a double-Z-pinch-driven hohlraum[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89: 245002.
- [8] Sanford T W L, Olson R E, Mock R C, et al. Dynamics of a Z-pinch X-ray source for heating inertial-confinement-fusion relevant hohlraums to 120–160 eV[J]. *Physics of Plasmas*, 2000, 7(11): 4669-4682.
- [9] Rochau G A, Bailey J E, Chandler G A, et al. High performance capsule implosions driven by the Z-pinch dynamic hohlraum[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2007, 49(12B): B591-B600.
- [10] 宁成, 丰志兴, 薛创. Z箍缩驱动动态黑腔中的基本能量转移特征. 物理学报, 2014, 63(12): 125208. (Ning Cheng, Feng Zhixing, Xuechuang. Basic characteristics of kinetic energy transfer in the dynamic hohlraums of Z-pinch. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(12): 125208.)
- [11] 丁宁, 邬吉明, 戴自换, 等. Z箍缩内爆的MARED程序数值模拟分析[J]. 物理学报, 2010, 59(12): 8707-8716. (Ding Ning, Wu Jiming, Dai Zihuan, et al. Numerical simulation analysis of Z-pinch implosion using MARED code[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(12): 8707-8716)
- [12] 肖德龙, 孙顺凯, 薛创, 等. Z箍缩动态黑腔形成过程和关键影响因素数值模拟研究[J]. 物理学报, 2015, 64: 235203. (Xiao Delong, Sun Shunkai, Xue Chuang, et al. Numerical studies on the formation process of Z-pinch dynamic hohlraums and key issues of optimizing dynamic hohlraum radiation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64: 235203)
- [13] 肖德龙, 戴自换, 孙顺凯, 等. Z箍缩动态黑腔驱动靶丸内爆动力学[J]. 物理学报, 2018, 67: 025203. (Xiao Delong, Dai Zihuan, Sun Shunkai, et al. Numerical studies on dynamics of Z-pinch dynamic hohlraum driven target implosion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 025203)
- [14] 何开辉, 冯开明, 李强, 等. 金属丝阵列Z箍缩装置中的瑞利-泰勒不稳定性[J]. 核聚变与等离子体物理, 2000, 20(4): 241-245. (He Kaihui, Feng Kaiming, Li Qiang, et al. Preliminary study of Rayleigh-Taylor instability in wire-array Z-pinch[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2000, 20(4): 241-245)
- [15] Shumlak U, Roderick N F. Mitigation of the Rayleigh-Taylor instability by sheared axial flows[J]. *Physics of Plasmas*, 1998, 5(6): 2384-2389.
- [16] 张扬, 丁宁. 轴向流对Z箍缩等离子体稳定性的影响[J]. 物理学报, 2006, 55(5): 2333-2339. (Zhang Yang, Ding Ning. The effect of axial flow on the stability in the Z-pinch[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(5): 2333-2339)
- [17] 段耀勇, 郭永辉, 王文生, 等. Z箍缩等离子体不稳定性的数值研究[J]. 物理学报, 2004, 53(10): 3429-3434. (Duan Yaoyong, Guo Yonghui, Wang Wensheng, et al. Numerical investigations of Z-pinch plasma instabilities[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(10): 3429-3434)
- [18] Wang Guanqiong, Xiao Delong, Dan Jiakun, et al. Preliminary investigation on electrothermal instabilities in early phases of cylindrical foil implosions on primary test stand facility[J]. *Chinese Physics B*, 2019, 28: 025203.
- [19] 陈忠旺, 宁成. 基于MULTI2D-Z程序的Z箍缩动态黑腔形成过程模拟[J]. 物理学报, 2017, 66: 125202. (Chen Zhongwang, Ning Cheng. Simulation of forming process of Z-pinch dynamic hohlraum based on the program MULTI2D-Z[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66: 125202)
- [20] Brownell J H, Bowers R L, McLenithan K D, et al. Radiation environments produced by plasma Z-pinch stagnation on central targets[J]. *Physics of Plasmas*, 1998, 5(5): 2071-2080.
- [21] 徐彬彬. Z箍缩动态黑腔内辐射温度与均匀性以及烧蚀层界面不稳定性研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017. (Xu Binbin. Research on the radiation temperature and radiation uniformity in Z-pinch dynamic hohlraum and the fluid instability in ablator[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017)
- [22] Fryxell B, Olson K, Ricker P, et al. FLASH: an adaptive mesh hydrodynamics code for modeling astrophysical thermonuclear flashes[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2000, 131(1): 273-334.
- [23] 龙城德, 赵斌, 袁鹏, 等. 小焦斑纳秒激光烧蚀铝平面靶的数值研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 102005. (Long Chengde, Zhao Bin, Yuan Peng, et al. Simulation of expansion of aluminum plasmas produced by a small focal spot nanosecond laser irradiation[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 102005)
- [24] Tzeferacos P, Fatenejad M, Flocke N, et al. FLASH magnetohydrodynamic simulations of shock-generated magnetic field experiments[J]. *High Energy Density Physics*, 2012, 8(4): 322-328.
- [25] 孙伟, 吕冲, 雷柱, 等. 磁场对激光驱动Rayleigh-Taylor不稳定性影响的数值研究[J]. 物理学报, 2022, 71: 154701. (Sun Wei, Lü Chong, Lei Zhu, et al. Numerical study of effect of magnetic field on laser-driven Rayleigh-Taylor instability[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71: 154701)
- [26] Faik S, Tauschwitz A, Iosilevskiy I. The equation of state package FEOS for high energy density matter[J]. *Computer Physics Communications*, 2018, 227: 117-125.
- [27] Kemp A J, Meyer-ter-Vehn J. An equation of state code for hot dense matter, based on the QEOS description[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1998, 415(3): 674-676.
- [28] 赵凯歌, 薛创, 王立锋, 等. 经典瑞利-泰勒不稳定性界面变形演化的改进型薄层模型[J]. 物理学报, 2018, 67: 094701. (Zhao Kaige, Xue Chuang, Wang Lifeng, et al. Improved thin layer model of classical Rayleigh-Taylor instability for the deformation of interface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67: 094701)