



·惯性约束聚变物理与技术·

嵌入硬泡沫层和靶丸的 Z 箍缩动态黑腔动力学行为及其辐射场模拟研究*

宁 成, 黄炜昊, 薛 创, 文 武

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 利用自行开发的二维辐射磁流体学程序, 模拟研究在软泡沫柱外嵌套硬泡沫层、中心嵌套结构靶丸的动态黑腔整体动力学行为和热力学性能, 以发现硬泡沫层对动态黑腔辐射场的影响和调制作用, 以及腔靶耦合相互作用规律。对峰值 50 MA、全上升时间 300 ns 的驱动电流, 模拟结果的比较分析表明, 嵌套硬泡沫层后靶丸感受到的辐射场温度开始升高时刻延后, 辐射均匀更迅速, 辐射温度第一峰下降, 变化更顺滑, 黑腔存在时间变长, 达到 10 ns 以上, 后期辐射温度大于 350 eV, 波形与美国靶丸点火成功实验中的黑腔辐射温度变化曲线比较接近; 与没有靶丸的动态黑腔的相同区域辐射温度相比较, 嵌入靶丸后, 靶丸在烧蚀后期感受到的辐射驱动温度增加。故嵌套硬泡沫层和腔靶耦合都有益于聚变靶丸的烧蚀内爆。

关键词: Z 箍缩; 动态黑腔; 辐射场调制; 惯性约束聚变; 靶丸

中图分类号: TL61

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230133

Numerical studies of the implosion behavior and radiation field of Z-pinch dynamic hohlraums with embedded hard foam layer and capsule

Ning Cheng, Huang Weihao, Xue Chuang, Wen Wu

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

Abstract: In this paper, by means of the developed two dimensional radiation magneto-hydrodynamic Lagrangian code, the dynamic hohlraums, which are consisted of tungsten plasma shell and low density foam cylinder with or without an embedded hard foam layer on the cylinder and a capsule in the center, are simulated. We understand the effects of the hard foam layer on the hohlraum radiation field, and the coupling of capsule and hohlraum for the capsule fusion, by comparing the simulated results of different configuration hohlraums. After applying a hard foam layer on the low density foam cylinder, the time, uniformity, and the first peak value of radiation field, receipted by the capsule, is delayed, increased, and reduced, respectively. Furthermore, the radiation temperature on the capsule surface is increasing smoothly, and the dwelling time of the hohlraum is prolonged. For a driven current of peak 50 MA and full rise time 300 ns, the dwelling time can be longer than 10 ns, and the radiation temperature at the late time can be higher than 350 eV. The time variation of the radiation temperature is close to that measured in American National Ignition Facility (NIF) hohlraum in which the capsule was imploded and the fusion energy of 1.37 MJ was released. After embedding a capsule into the center of low density foam cylinder, the radiation temperature receipted by the capsule during the late process increases. This implies that both the hard foam layer and the coupling of the capsule and the dynamic hohlraum are good for the capsule ablating implosion.

Key words: Z-pinch, dynamic hohlraum, radiation field modulation, inertial confinement fusion, capsule

美国能源部在 2022 年底正式向全世界宣布: 美国国家点火装置(NIF)成功实现了激光驱动的惯性约束核聚变点火, 核聚变反应放出了 3.15 MJ 能量, 大于输入到聚变系统中的激光能量 2.05 MJ^[1]。此前, 他们还完成了一发比较成功的靶丸点火实验, 并对该发实验结果进行了比较全面的物理分析和数值模拟^[2-4]。聚变点火实验成功在人类

* 收稿日期: 2023-03-15; 修订日期: 2023-06-13

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(11135007); 国家自然科学基金面上项目(11675025)

联系方式: 宁 成, ning_cheng@iapcm.ac.cn。

探索可控核聚变道路上具有里程碑性重大意义。它在物理上表明,现行的激光辐射间接驱动惯性约束核聚变技术途径是可行的,从而一定程度意味着Z箍缩驱动的动态黑腔惯性约束核聚变技术途径也是可行的;点火成功将人类开发清洁核聚变能应用研究向前推进了一大步,也为今后在实验室开展武器物理问题研究提供了现实的可能性。

在激光驱动的聚变研究中,传统上采用的是柱形黑腔^[5],而为了提高激光-X光能量转换效率,增加靶丸感受到的X光辐射驱动对称性,我国的科研人员提出了八面体六孔球腔^[6-8]、六通腔^[9]等黑腔构型。在Z箍缩驱动的聚变研究中,目前人们也提出了三种黑腔构形:双端驱动黑腔、静态壁黑腔和动态黑腔^[10]。前两种黑腔,它们的辐射源和靶丸相对分离,其辐射场的对称性均比较好,能满足惯性约束聚变对辐射场对称性的要求,但其能量耦合效率较低,需要较高水平的驱动电流才能达到聚变点火条件。而在Z箍缩动态黑腔中,内爆等离子体和动能-X光辐射能量转换体(泡沫柱)及嵌套在泡沫柱中心的聚变靶丸能紧密地耦合在一起,它们之间的能量耦合转换效率比较高,有可能在驱动电流水平较低的装置上实现Z箍缩驱动的惯性约束聚变点火。在黑腔能量学研究中,主要关注的因素有:辐射场强度、能量转换效率、辐射场的时间行为和对称性。前者主要决定于激光输入能量或Z箍缩驱动电流水平,后面三者与黑腔构型设计有非常紧密的关系,需要针对具体应用进行精细的物理研究和设计。

2000年前后,美国Sandia实验室在其Z装置上对动态黑腔进行了比较多的实验研究^[11-15]。在20 MA的Z装置上,实验测得动态黑腔中的辐射温度超过了200 eV,在首次Z箍缩动态黑腔驱动充气靶丸出中子实验中产生了 $(1\sim 5)\times 10^{10}$ 个热核中子^[16]。2D程序LASNEX对动态黑腔中丝阵内爆到泡沫柱能量转换体、嵌套在泡沫柱中的聚变靶丸烧蚀内爆、电极板对辐射吸收等过程进行了整体数值模拟^[17]。丝阵内爆时间在100 ns左右,而紧接着的靶丸内爆仅有几个纳秒。模拟得到的中子产额比实验测量值大两倍,冲击波速度比测量值高30%,靶丸心部气体温度比由光谱推测值高。2010年至今,我国在动态黑腔实验和数值模拟方面也进行了比较广泛的研究^[18-24],在8~10 MA的Z箍缩装置上,在软泡沫柱+内爆等离子体的简单动态黑腔实验中诊断到了大于100 eV的黑腔辐射温度^[19],数值模拟也再现了该动态黑腔中辐射冲击波和辐射热波的形成和传播过程^[20-21,25]。但研究工作主要集中在Z箍缩内爆等离子体对中心软泡沫柱的碰撞冲击、辐射产生过程等的观测和模拟研究,在假定黑腔或靶丸辐射驱动温度下,对靶丸的辐射烧蚀内爆过程进行了模拟^[22-23],而面向实际聚变需求的辐射场调制、动态黑腔和聚变靶丸的耦合和相互影响,以及它们的整体数值模拟等方面还研究得比较少。随着点火级驱动电流的电磁驱动聚变大科学装置项目的逐步实施,作为实现Z箍缩惯性约束聚变点火主要技术途径的动态黑腔还需要结合实际的聚变靶丸内爆对称性和点火要求,加快深入开展相关的研究。

由Z箍缩内爆等离子体和中心软泡沫柱组成的简单动态黑腔构型,易于加工,方便开展实验和模拟研究,但与面向实际聚变点火研究和聚变能应用的黑腔有很大的差异。在简单动态黑腔中心嵌入带结构的靶丸后,整个动态黑腔的动力学行为和靶丸表面感受到的辐射烧蚀温度与简单动态黑腔中的辐射温度时间行为会有比较大变化。柱形Z箍缩内爆等离子体与球形靶丸的柱-球耦合构型,天然地会让靶丸感受到不均匀的辐射场,并且简单动态黑腔的存续时间也比较短,不能满足将来聚变能应用中大半径靶丸需要较长烧蚀内爆时间的要求。因此,本文先在简单动态黑腔的软泡沫柱外嵌套上硬泡沫层,将内爆动能热化和辐射产生与辐射传输和均匀化适当分开,模拟研究硬泡沫层对动态黑腔辐射场的影响和调制作用;然后在软泡沫柱中心嵌套上模拟靶丸,模拟研究(有或没有硬泡沫层)黑腔辐射场对靶丸铍层烧蚀膨胀及其引起靶丸内爆压缩的过程,追踪铍层表面辐射温度的变化,以获得Z箍缩动态黑腔和靶丸之间的耦合相互作用和影响关系,深化对动态黑腔动力学行为和相关物理的理解。

1 硬泡沫层和靶丸对动态黑腔形成过程的影响

为了简化Z箍缩动态黑腔实际形成过程的复杂性,方便分析模拟,发现其中的物理规律,本文从给定Z箍缩动态黑腔的驱动电流波形出发,将Z箍缩与脉冲功率装置的耦合分离。用正弦的4次方函数来描述驱动电流随时间的变化,即 $I = I_0 \sin^4(0.5\pi t/T_0)$,其中 I_0 为峰值电流(MA), T_0 为电流从零上升到峰值的时间(ns), t 为时间(ns)。对于短脉冲电流,正弦的4次方函数通常能较好地吻合电流的上升沿。本文所利用的升级版MULTI2D^[24]程序及物理模型在以前发表的文章^[25-26]中有清楚的阐述,这里不再赘述。

图1是本文研究嵌套有硬泡沫层和结构靶丸的动态黑腔结构示意图(为了能看清楚钨等离子体壳层和靶丸结构,图中没有按实际比例给出)。厚为0.3 cm的钨等离子体壳层(图中标注为W-main)的线质量为11.8 mg/cm,其质量中心半径为4 cm;软泡沫柱半径为0.4 cm,密度为10 mg/cm³,在其外表面嵌套厚度0.03 cm、密度100 mg/cm³的硬泡沫层,即硬泡沫层线质量为7.8 mg/cm。在钨等离子体壳层和硬泡沫层之间填充密度为0.05 mg/cm³的钨先驱

等离子体(图中标注为 W-pre)。这里面向未来聚变能源的应用,选择了 3 cm 高的负载。在给定驱动电流的情况下,负载高度对模拟结果的影响很小。靶丸烧蚀层铍的内、外半径分别为 0.295 cm 和 0.3 cm,模拟靶丸内部暂时放置密度为 100 mg/cm³ 的泡沫。在零维上,这个动态黑腔模型与本文准备模拟的峰值 $I_0 = 50$ MA、全上升时间 $T_0 = 300$ ns 的点火级驱动电流基本匹配^[27]。

在本文的数值模拟中,采用柱坐标系,模拟区域如图 1 所示。首先对嵌套有硬泡沫层和靶丸的动态黑腔模拟区域进行非结构三角形网格剖分,当模型没有硬泡沫层或靶丸时,则将该区域的物质改成软泡沫就行了,从而保持整个网格剖分不变,避免网格剖分对模拟结果的可能影响。由于目前国内外都还没有 50 MA 电流水平的脉冲功率装置,也就没有相应的 Z 箍缩实验结果,因此,在这么高电流水平上的程序及模拟结果都无法标定,也就无法对重要的等离子体输运系数如磁化等离子体电阻率进行修正调整,从而可能导致等离子体最后箍缩得比较紧,辐射功率峰值比较高。但这些情况对我们主要关心的主冲击波到轴心前动态黑腔形成阶段的物理结果影响不大。

1.1 无嵌入靶丸情况

首先比较研究在没有中心靶丸情况下,在简单动态黑腔中的软泡沫柱外嵌套上硬泡沫层后动态黑腔动力学行为、热力学性能、辐射场等的变化情况。图 2 是在没有嵌套中心靶丸情况下,没有嵌套和有嵌套硬泡沫层时的动态黑腔形成流线图(也即是各质量点内爆轨迹图),同时也给出了径向 X 光功率变化图。X 光功率极大值时刻,对应各层材料内爆碰撞,或冲击波挤压,或冲击波到轴心形成高温高密度等离子体的时刻。在图 2(a)中,在半径 $r > 0.43$ cm 的区域全部是钨等离子体,内部全部是软泡沫等离子体,但在为硬泡沫层和铍层预留的区域中划分的网格比较小,看到的流线比较多;三个 X 光功率极值峰分别对应钨等离子体壳与软泡沫柱初始碰撞时刻和强烈碰撞时刻,以及内爆主冲击波到轴心时刻;X 光功率主脉冲峰的半高宽大约为 2 ns,表明该动态黑腔构型的内爆形成过程很快。在图 2(b)中,在半径 0.4 ~ 0.43 cm 区域是硬泡沫层,其他的与图 2(a)中的一样;可见在 310 ns 后硬泡沫层因受到内爆钨等离子体的辐射加热而膨胀;图中也出现了三个 X 光功率极值峰,它们可能分别对应钨等离子体壳与膨胀硬泡沫层强烈碰撞时刻、与硬泡沫层和软泡沫柱一起碰撞时刻、内爆主冲击波到轴心时刻;X 光功率主峰的半高宽大约为 4 ns。比较图 2(a)和图 2(b)结果知,嵌套上硬泡沫层后,动态黑腔形成过程稍稍变慢,X 光功率峰值迅速变小,半高宽增大,各层等离子体碰撞强度变弱。

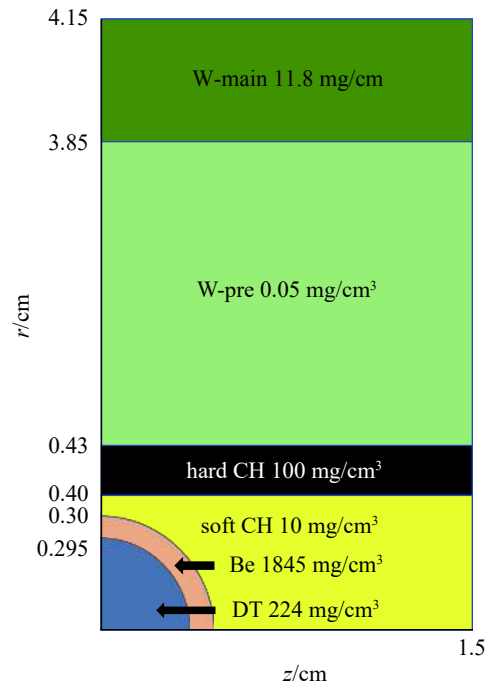


Fig. 1 Used model configuration of dynamic hohlraum with a hard foam (CH) layer outside the soft foam column and an embedded capsule in the center

图 1 嵌套有硬泡沫层和靶丸的动态黑腔结构示意图

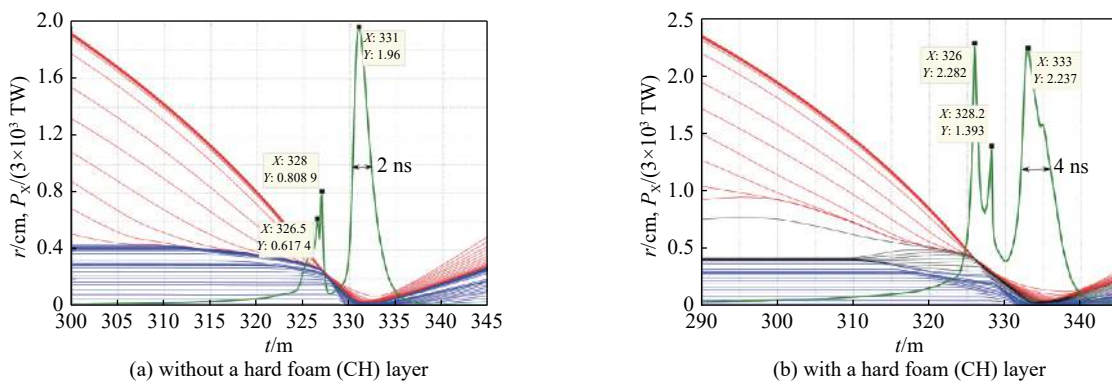


Fig. 2 Trajectories of imploding plasma of dynamic hohlraum and X-ray power without a capsule in the center. The red lines, black lines, blue lines, and the green lines depict the W plasma, the hard foam layer, the soft foam, and the variation of X-ray power, respectively

图 2 无靶丸情况下动态黑腔内爆流线和径向 X 光辐射功率随时间的变化

图 3 和图 4 分别是动态黑腔内爆形成过程中各材料层动能及总动能随时间的变化情况。图 3 清楚地表明了钨等离子体的加速和动能快速增大, 以及与软泡沫柱/或硬泡沫层碰撞后动能快速下降, 同时将损失的动能迅速地转移到泡沫等离子体上, 碰撞后期它们也可能整体一起再被洛伦兹力加速内爆, 产生更高的动能。在图 3(a) 中, 内爆钨等离子体动能的第一个极大值是 19.22 MJ (6.41 MJ/cm), 通过碰撞后, 大约 31% 的动能转移到内部软泡沫柱上, 此后软泡沫柱和钨等离子体一起再被加速内爆, 软泡沫柱等离子体动能最后达到最大值 11 MJ (3.67 MJ/cm)。在图 3(b) 中, 在软泡沫柱外嵌套硬泡沫层后, 可见动能转移情况发生了明显的变化, 内爆钨等离子体的最大动能变小, 但仍然达到 4 MJ/cm, 36% 在碰撞后转移到了硬泡沫层等离子体上, 此后硬泡沫和软泡沫等离子体一起整体再被加速内爆, 最后硬泡沫和软泡沫等离子体的最大动能分别达到钨等离子体最大动能的 75.5% 和 50%。从图 4 可见, 动态黑腔总动能主峰的峰值由无硬泡沫层的 9.8 MJ/cm 降低为有硬泡沫层的 7.55 MJ/cm, 而其半高宽则分别由无硬泡沫层的 6.3 ns 增大为有硬泡沫层的 9 ns。表明增加硬泡沫层后使动态黑腔的最大动能下降, 整个动态黑腔处于快速运动中的时间变长, 也就意味着动态黑腔的存在时间变长了, 从而能更好地适合于需要长辐射驱动时间的大靶丸聚变。

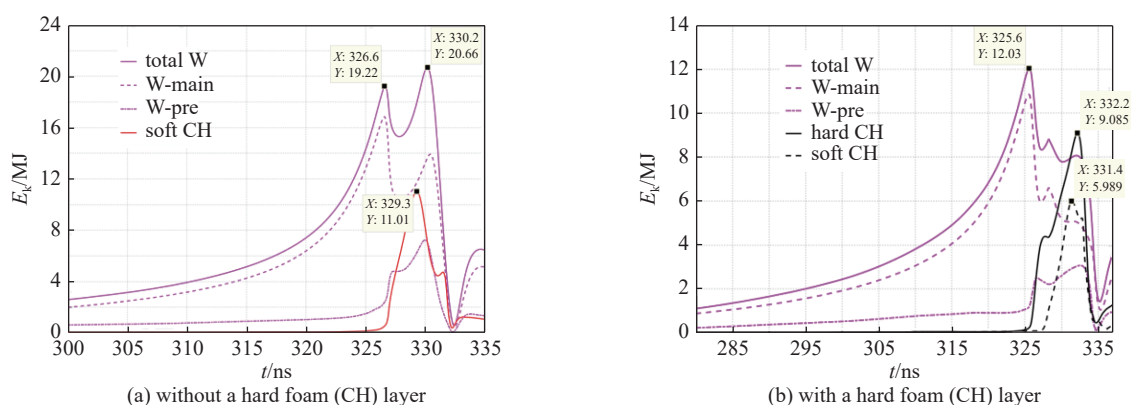


Fig. 3 Time variations of kinetic energy of imploding plasmas in dynamic hohlraum without a capsule in the center

图 3 无靶丸情况下动态黑腔内爆过程中各物质层的动能随时间变化

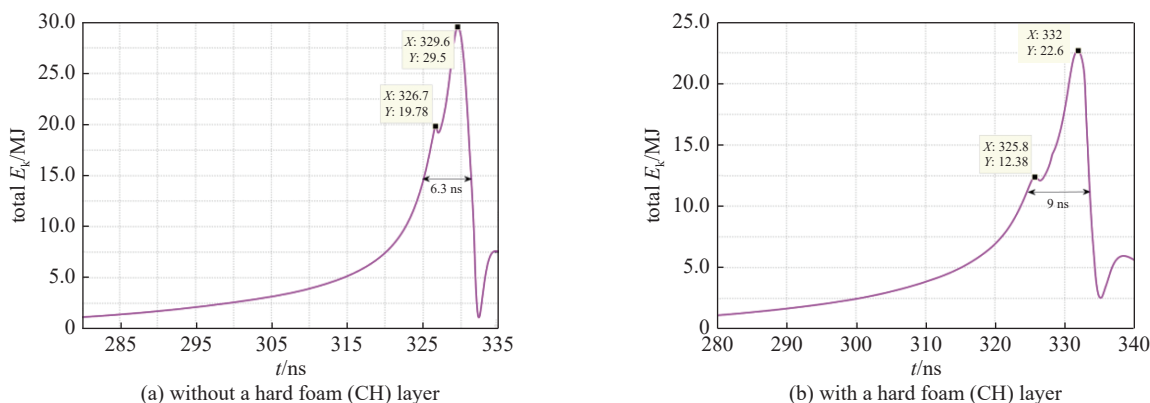


Fig. 4 Time variation of total kinetic energy of imploding plasmas in dynamic hohlraum without a capsule in the center

图 4 无靶丸情况下动态黑腔内爆过程中总动能随时间的变化

下面我们再来看看整个动态黑腔体系的热力学性能变化情况。图 5(a) 和图 5(b) 分别是没有和有硬泡沫层时动态黑腔中等离子体平均物质温度和平均辐射温度随动态黑腔形成过程的变化。从图 5(a) 和图 5(b) 可以看到, 在钨等离子体壳与泡沫碰撞以前和主冲击波到轴心反弹后, 平均物质温度和平均辐射温度基本上重合, 没有明显分离, 但当钨等离子体壳与泡沫碰撞后至主冲击波到轴心反弹前, 这是动态黑腔形成的主要阶段, 物质温度与辐射温度明显脱离, 物质温度高于辐射温度; 从 300 ns 至 320 ns 时间段内, 没有硬泡沫层的动态黑腔平均温度增长得更快一些, 这会过早地预热甚至烧蚀靶丸; 平均辐射温度第一个极大值时刻对应钨等离子体壳与泡沫强烈碰撞热化时刻(见图中左边标记), 有硬泡沫层时的平均辐射温度比没有硬泡沫层时的低, 但若认为当主冲击波到离轴心 0.1 cm 前的时间为辐射场驱动靶丸内爆的有效时间, 则其维持在较高辐射温度的时间有约 5 ns, 而没有硬泡沫层时仅有约 2 ns; 有硬泡沫层时, 整个动态黑腔体系的平均物质温度曲线的半高宽为 7.7 ns 左右, 而没有硬泡沫层时仅有

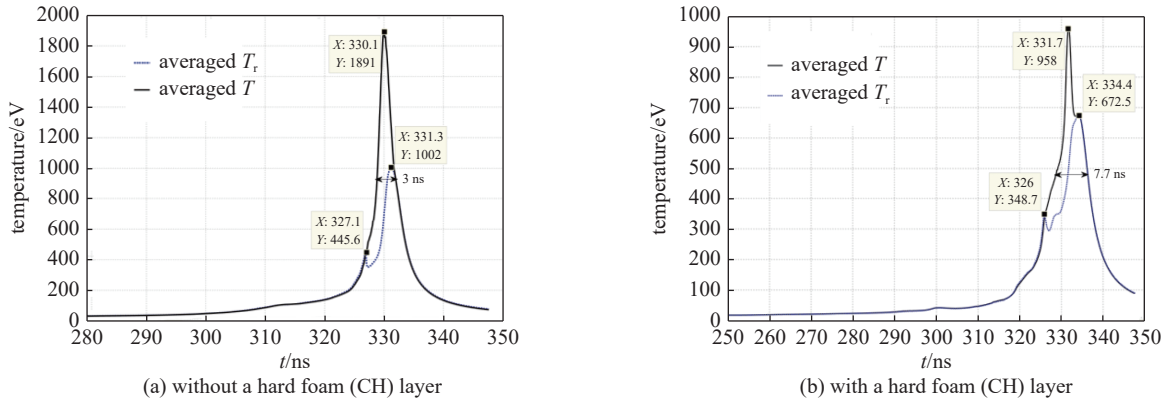


Fig. 5 Time variations of averaged matter and radiation temperatures in dynamic hohlraum without a capsule in the center

图 5 无靶丸情况下动态黑腔内爆过程中全域平均物质温度和平均辐射温度随时间的变化

3 ns 左右。

图 6 是半径为 0.3 cm 的观察(球)面上三个物质点(它们随着等离子体运动,它们的半径方向与 z 轴成 45°, 60°和 90°)的质量密度和辐射温度随动态黑腔形成过程的变化情况。

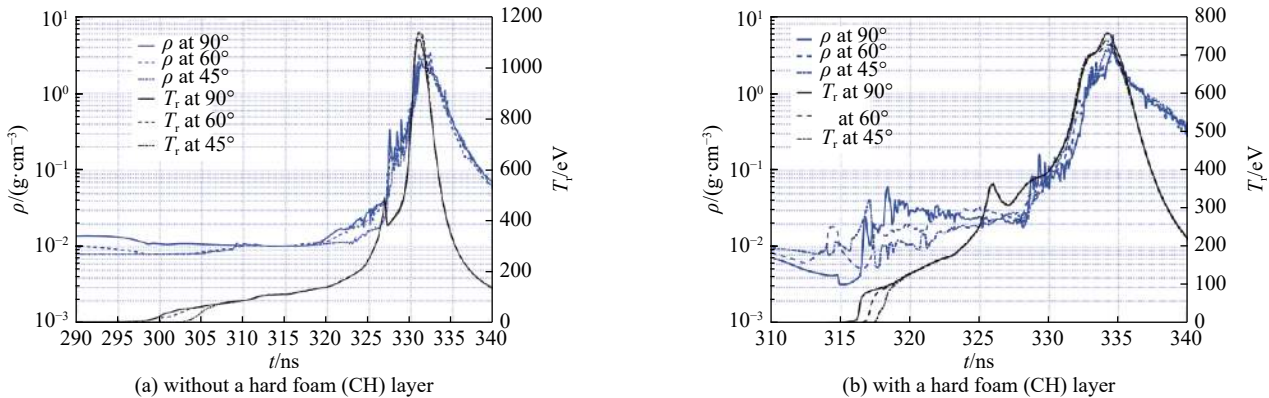


Fig. 6 Time variations of mass density and radiation temperature of three mass points, which are located in a circle of radius 0.3 cm with angles of 45°, 60°, 90° from z-axis, in soft foam (CH) without a capsule in the center

图 6 无靶丸情况下,距中心 0.3 cm,与中心连线与 z 轴成 45°, 60°, 90° 的三个软泡沫物质点的密度和辐射温度随动态黑腔内爆形成过程的变化

从图 6(a)可以看到,在软泡沫柱中半径为 0.3 cm 的观察(球)面上,其辐射温度在 295 ns 后就开始缓慢增加了(从图 5(a)中也能看到这点),并且在 90°方向(相当于靶丸的赤道)温度最先开始增长,由于辐射热传导的滞后,球面上其他点的温度也逐渐开始增长,但到了 307 ns 左右球面上的温度就基本上均匀了;这是由于内爆钨等离子体中的欧姆加热导致其温度升高,热量通过辐射和热传导传输到软泡沫柱中,使软泡沫等离子体温度上升;到 320 ns 后观察(球)面上的密度也开始增加,这是由于钨先驱等离子体中的压力增加,驱动软泡沫柱压缩所致;当钨等离子体壳与软泡沫柱强烈碰撞时(326 ns 左右),观察(球)面上的辐射温度快速增加,形成第一个辐射温度极值峰,并且此时观察(球)面上的密度也迅速增大,说明碰撞主冲击波已经影响到这里。比较嵌套硬泡沫层的模拟结果图 6(b),可以清楚地看到,考察(球)面上的密度和辐射温度变化均有了不同。首先观察(球)面上的辐射温度增加推迟到 315 ns 前后,并且温度增长的速度更快;观察(球)面上密度的增加几乎与温度的增加同时,这主要是由于硬泡沫层受辐射加热而膨胀,致使软泡沫柱被压缩所致,但当球面上的辐射温度均匀后,密度也基本上保持不变;当钨等离子体壳与泡沫发生强烈碰撞后,观察球面上的辐射温度也达到了一个极值,但此时观察球面上的密度并没有马上增长,而是延后了大约 3 ns 才快速增加,这说明碰撞冲击波在辐射热波到达观察(球)面 3 ns 后才到达,这一时间间隔对于靶丸辐射烧蚀压缩、球形内爆非常重要。

1.2 嵌入靶丸, 无嵌入硬泡沫层情况

这里我们在简单动态黑腔模型中嵌套上靶丸,观察研究此时的动态黑腔动力学行为、热力学性能、辐射场等的变化情况,通过与无靶丸时的模拟结果比较,可以获得腔靶耦合的物理认识。如图 1 中所示,这里的模型只要把图中的硬泡沫层改变为软泡沫就可以,其他不变。

图 7(a) 是嵌套有靶丸、没有硬泡沫层情况下钨等离子体壳内爆、软泡沫柱被碰撞压缩、靶丸铍层被烧蚀膨胀及其引起靶丸内爆压缩等过程的流程图, 以及内爆过程中系统沿径向辐射出的 X 光功率随时间变化。该图与图 2(b) 有一定的相似性, 只是这里是靶丸的烧蚀层铍的受热膨胀。X 光功率的第一个小峰和第二个窄峰是内爆钨等离子体与靶丸外的软泡沫层及膨胀铍相互碰撞而产生, 与无靶丸无硬泡沫层的情况相比, 它们的峰值时刻早一点, 第二个窄峰高一些, 说明嵌入靶丸后等离子体碰撞要早和强烈一点; 第三个 X 光峰可能是铍层膨胀在靶丸内部形成的压缩冲击波到轴心, 以及碰撞产生的主冲击波与内部等离子体挤压而产生, 其半高宽为 2.5 ns 左右, 比无靶丸无硬泡沫层时的要稍宽, 比无靶丸有硬泡沫层时的要窄; 而 X 光功率极大值比无靶丸无硬泡沫层时的要低, 但比无靶丸有硬泡沫层时的要高。当然 X 光功率波形的相对宽窄和高低, 与靶丸大小和材料, 以及硬泡沫层的位置和密度有关。图 7(b) 是动态黑腔中全域平均物质温度和平均辐射温度随时间的变化情况。这两条温度变化曲线与无靶丸无硬泡沫层及无靶丸有硬泡沫层的曲线都比较相似, 该动态黑腔体系的平均物质温度的半高宽为 7 ns 左右, 比无靶丸无硬泡沫层时的大大增长, 即嵌套入靶丸对动态黑腔中的辐射场有较大的影响, 但这对聚变靶丸均匀对称烧蚀有利。

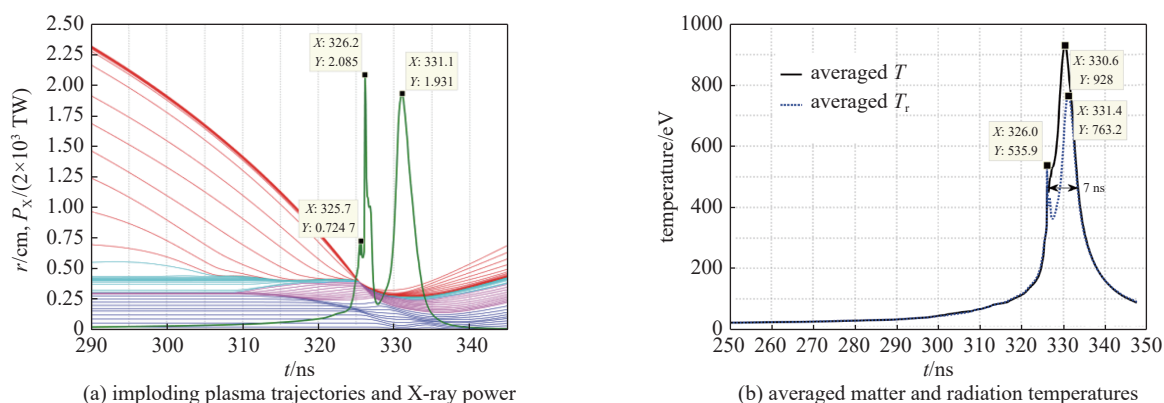


Fig. 7 Data of the dynamic hohlraum with a capsule but without a hard foam (CH) layer. (a) Imploding plasma trajectories and X-ray power. In figure (a), the red lines, cyan lines, fuchsia lines, blue lines, and the green lines depict the W plasma, the soft foam, the Be layer, the foam inside the capsule, and the variation of X-ray power, respectively. (b) Time variations of averaged matter and radiation temperatures over the whole simulation domain

图 7 有靶丸、无硬泡沫层情况下, (a) 动态黑腔内爆流线和径向 X 光辐射功率随时间的变化, 其中红色线为钨等离子体, 青色线为软泡沫柱, 品红色线为铍层, 蓝色线为靶丸内层泡沫, 以及绿色线为 X 光辐射功率; (b) 动态黑腔内爆过程中全域平均物质温度和平均辐射温度随时间的变化

图 8 是各材料壳层等离子体内爆动能和体系总动能随动态黑腔形成过程的变化。与图 3 和图 4 相似, 它们清晰地表明了体系动能随时间的变化, 以及各层等离子体碰撞、相互作用后动能转移和再加速的情况。钨等离子体壳与软泡沫柱碰撞前, 其最大动能达到了 6.14 MJ/cm, 碰撞后约 27% 的最大动能转移到软泡沫柱等离子体上, 此后, 它们一起整体地在洛伦兹力作用下继续加速内爆, 最后软泡沫柱等离子体的最大动能达到 3.1 MJ/cm。在本模型的模拟中, 靶丸铍层因辐射烧蚀而膨胀、压缩内爆, 铍层等离子体的最大动能达到了 288.9 kJ。总动能随时间变化曲线的半高宽为 6.4 ns, 比无靶丸无硬泡沫层情况 (见图 4(a)) 的半高宽增加了 0.1 ns, 但最大动能却稍下降一点。

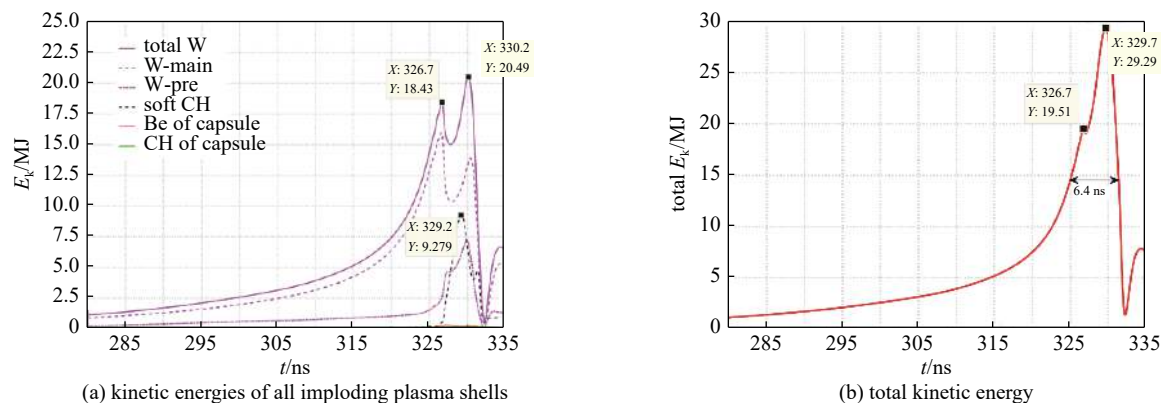


Fig. 8 Time variations of the kinetic energies of all imploding plasma shells and total kinetic energy in the dynamic hohlraum with a capsule but without a hard foam (CH) layer

图 8 有靶丸、无硬泡沫层情况下, 动态黑腔内爆形成过程中各层等离子体动能和总动能随时间的变化

靶丸半径是 0.3 cm、铍层厚 50 μm 、内部填充密度为 0.1 g/cm^3 的泡沫。为了考察靶丸表面的辐射驱动情况，而跟踪铍层外表面上三个网格的密度和辐射温度随动态黑腔形成过程中的变化情况。网格中心点与坐标原点的连线与 z 轴正方向的夹角分别为 30°、60°和 90°。图 9 是模拟结果，在 295 ns 后靶丸表面 90°方向上的铍首先感受到辐射温度的增加，其他各点感受到辐射温度的增加时刻依次推后，但大约在 312 ns 后铍层表面感受到的辐射温度就基本上相同了；大约在 309 ns，密度下降，整个铍层开始膨胀，说明辐射烧蚀已经开始；在 325 ns 后，铍层等离子体受到外面内爆等离子体的碰撞挤压作用而被压缩，密度开始增加，直至发生强烈的相互作用，此时，铍层感受到了强烈的辐射冲击，辐射温度接近 700 eV，远高于无靶丸无硬泡沫层时相同区域的辐射冲击温度(见图 6(a))。

1.3 嵌入靶丸和硬泡沫层情况

前面对增加硬泡沫层对简单动态黑腔动力学行为、热力学性能和辐射场的影响，以及靶丸和简单构型动态黑腔的耦合、相互影响等进行了详细的分析和比较研究，获得了初步的认识。在此基础上，在软泡沫柱外表面和中心同时嵌套上硬泡沫层和靶丸，如图 1 所示，仍然在 50 MA 电流的驱动下，通过整体数值模拟，观察研究其中的内爆动力学行为、热力学性能和辐射场情况。

图 10(a)是钨等离子体壳内爆、硬泡沫层受热膨胀和被碰撞压缩、软泡沫柱被碰撞压缩、靶丸铍层被辐射烧蚀膨胀及其引起靶丸内爆压缩等全过程的流线图，以及内爆过程中系统沿径向辐射出的 X 光功率随时间的变化情况。图中展示了内爆钨等离子体壳的加速内爆，然后与硬泡沫层、软泡沫柱和靶丸碰撞，相互挤压的流体运动状况，图中的 X 光功率峰值高低和时刻，反映了相互碰撞和挤压的强烈程度及对应时刻。第一个 X 光功率峰主要是由高速运动的钨等离子体和硬泡沫等离子体碰撞而产生，第二个 X 光功率峰是由高速运动的钨等离子体和硬泡沫等离子体碰撞产生的主冲击波与膨胀的铍层相互作用而产生，第三和第四个 X 光功率峰可能主要是铍层膨胀在靶丸内引起的冲击波到轴心，然后反射并与主冲击波碰撞挤压而产生。与无靶丸有硬泡沫层的情况(见图 2(b))比较可见，增加靶丸后，使钨等离子体与内部物质的碰撞更强烈，导致该时刻的 X 光功率峰值更高，脉宽更窄。图 10(b)是总内爆动能随动态黑腔形成过程的变化，可见，主碰撞前系统动能达到了 4.18 MJ/cm，而此后的继续加速，最大动能达到了 6.76 MJ/cm；动能曲线的半高宽增大到了 10 ns，说明嵌套有硬泡沫层和靶丸的动态黑腔系统内爆加速时间最长，黑腔形成和存在的时间也将是最长的。

图 11 是嵌套有靶丸和硬泡沫层情况下动态黑腔内爆过程中各物质层动能随时间的变化，其中图 11(b)是为了

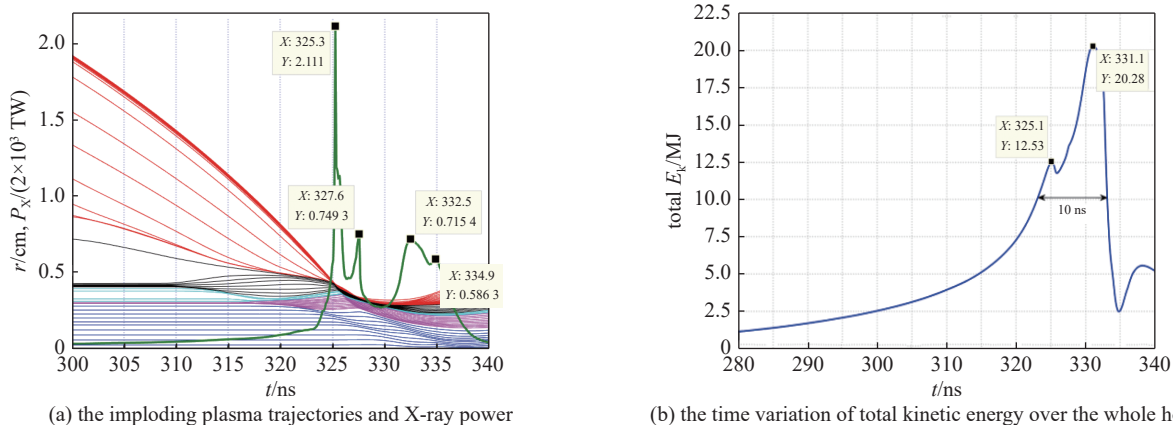


Fig. 10 Data of the dynamic hohlraum with a capsule and a hard foam (CH) layer. (a) The imploding plasma trajectories and X-ray power. In figure (a), the red lines, black lines, cyan lines, fuchsine lines, blue lines, and the green line depict the W plasma, the hard foam layer, the soft foam, the Be layer, the foam inside the capsule, and the variation of x-ray power, respectively. (b) The time variation of total kinetic energy over the whole hohlraum

图 10 有靶丸和硬泡沫层情况下，动态黑腔内爆流线和径向 X 光辐射功率随时间的变化及动态黑腔内爆过程中总动能随时间的变化

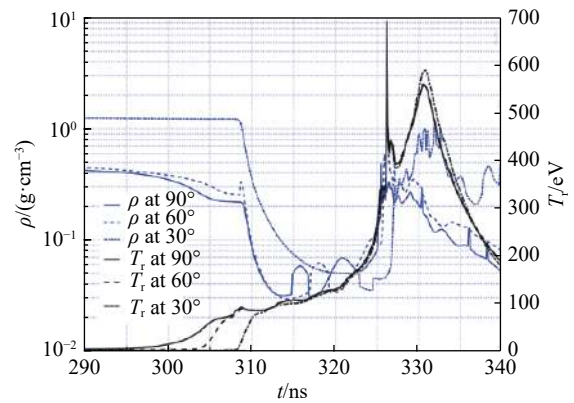


Fig. 9 In the dynamic hohlraum with a capsule but without a hard foam (CH) layer, the time variations of Be mass density and radiation temperature of the three mass points, which are located in a circle of radius 0.3 cm with angles of 30°, 60°, and 90° from z -axis

图 9 有靶丸、无硬泡沫层情况下，半径为 0.3 cm 的靶丸表面上，三个铍物质点(它们的半径方向与 z 轴分别成 30°、60°和 90°)的密度和辐射温度随动态黑腔内爆形成过程的变化

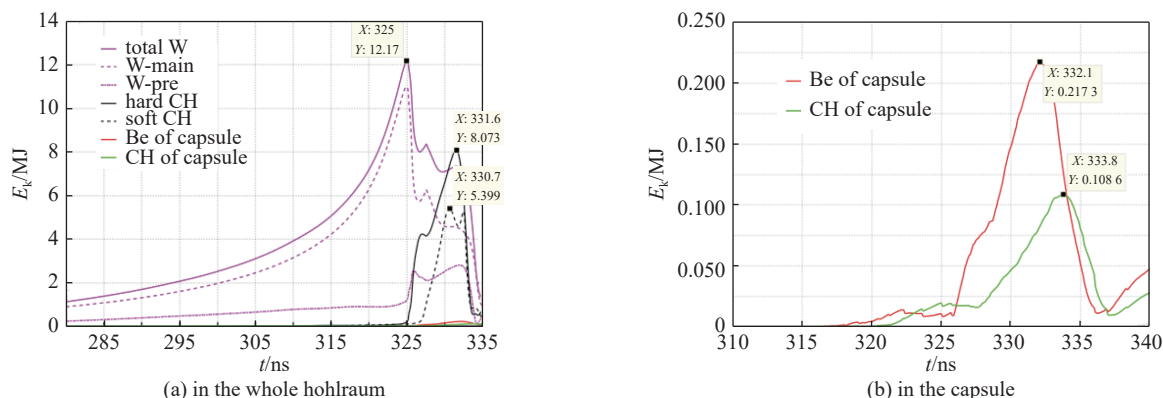


Fig. 11 Time variations of kinetic energies of all imploding plasma shells in the whole hohlraum and only in the capsule for the dynamic hohlraum with a capsule and a hard foam (CH) layer

图 11 有靶丸和硬泡沫层情况下, 动态黑腔内爆形成过程中各层等离子体动能和靶丸中各层动能随时间的变化

看清楚靶丸各层动能变化而单独画出来的。它反映出各等离子体层的加速、碰撞动能转移、挤压整体加速等情况。钨等离子体在碰撞前达到最大动能 4.06 MJ/cm, 与硬泡沫碰撞后迅速下降, 硬泡沫等离子体获得 1.4 MJ/cm 的动能(约为钨等离子体最大动能的 34.5%), 此后, 软泡沫、铍层、靶丸内泡沫依次被碰撞、挤压加速而获得动能, 铍层等离子体在 332 ns 获得最大动能 217.3 kJ, 靶丸内泡沫等离子体在 333.8 ns 获得最大动能 108.6 kJ。可见在本模型中, 内爆动能向靶丸转移的效率在 5% 左右, 并不是很高。

图 12 是动态黑腔中全区域平均物质温度和平均辐射温度, 以及各层内平均物质温度随时间的变化。全域平均温度的变化规律与前面三种情况类似, 只是峰值高低和时刻有差异。这里强烈碰撞时平均温度极值是 406 eV, 平均物质温度变化曲线的半高宽增加为 12.4 ns。图 12(b) 着重放大显示了与钨等离子体壳碰撞前各层的平均物质温度, 图中还标出了硬泡沫层和铍层膨胀开始时刻和相应的平均温度, 可见硬泡沫层在 309 ns 左右开始膨胀, 此时平均温度约 41.8 eV, 铍层在 317 ns 左右开始膨胀, 此时其平均温度约 19.4 eV。从图中还可以看到, 钨等离子体温度在驱动电流开始 40 ns 左右后就缓慢增长, 碰撞前能达到 100 eV 量级。

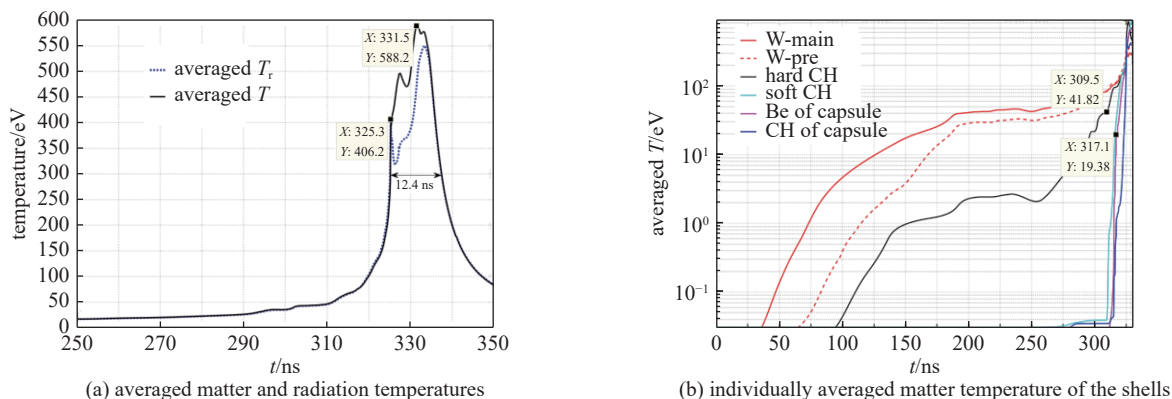


Fig. 12 Time variations of totally averaged matter and radiation temperatures, and individually averaged matter temperature of the shells, in the dynamic hohlraum formation, with a capsule and a hard foam (CH) layer

图 12 有靶丸和硬泡沫层情况下, 动态黑腔内爆过程中全域平均物质温度和辐射温度, 及各层物质平均温度随时间的变化

图 13(a) 是实时追踪观察靶丸铍层表面三个物质点的密度和辐射温度变化情况。为了全文一致, 我们这里追踪靶丸表面三个物质点的半径方向仍然与 z 轴正方向分别成 30° 、 60° 和 90° 。与图 9 的情况(有靶丸无硬泡沫层)相比, 靶丸铍层感受到辐射温度开始增加的时刻因硬泡沫层的嵌入而被推迟了 20 ns 左右, 并且大约经过 5 ns 后靶丸表面的辐射温度就基本上均匀了(而无硬泡沫层时大约需要 20 ns), 还有铍层感受到辐射温度极值峰 1~2 ns 后, 其密度才开始增加(而没有硬泡沫层时, 辐射温度和密度几乎同时增加), 表明辐射峰先于碰撞主冲击波到达靶丸表面, 从而有利于靶丸的辐射烧蚀和球形内爆压缩。此外, 硬泡沫层的加入, 使靶丸感受到的最强辐射峰大大下降了, 辐射温度随时间的变化更加平顺光滑, 与 NIF 装置上聚变点火成功的辐射驱动温度波形^[1-3] 比较相近(见图 14)。

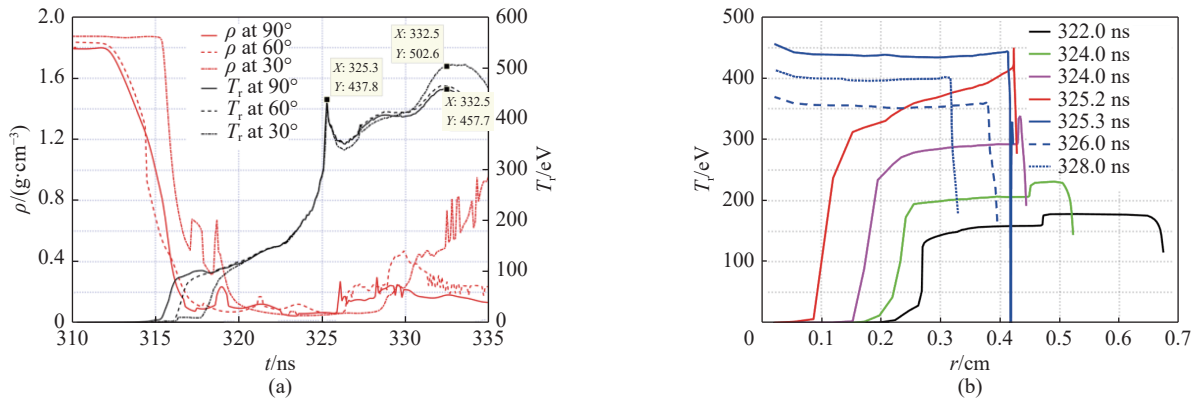


Fig. 13 In the dynamic hohlraum with a capsule and a hard foam (CH) layer, (a) the time variations of Be mass density and radiation temperature of three mass points, which are located in a circle of radius 0.3 cm; (b) radial profile of the radiation temperature along the equator at different time

图 13 有靶丸和硬泡沫层情况下, (a) 半径为 0.3 cm 的靶丸表面上, 三个铍物质点的密度和辐射温度随动态黑腔内爆形成过程的变化; (b) 辐射温度沿赤道(90°方向)径向的分布和演化

图 13(b) 是动态黑腔形成主要阶段在几个时刻辐射温度沿赤道径向的分布。它实际上反映了因钨等离子体壳与内部等离子体强烈碰撞而产生的辐射热波向轴心传播的过程。可以发现, 辐射热波的传播速度愈来愈快, 几个纳秒就传输到了轴心, 当达到轴心后, 内部辐射温度在半径上的分布就比较均匀了, 此后随着等离子体膨胀和压缩的动态演化, 辐射温度呈现出整体下降或升高的情况。

为了与美国激光惯性约束聚变装置(NIF)上的黑腔辐射温度波形进行比较, 图 14 中画出了其靶丸点火比较成功、已发表的辐射温度^[2], 以及上面图 13(a) 中 90° 方向上靶丸感受到的辐射温度(已将辐射温度开始升高点, 取为零点)随时间的变化。在 NIF 的黑腔辐射温度曲线中, 点火前它大致有三个升温阶段, 9 ns 后的快速上升是由于靶丸点火, 核聚变反应放能而引起的辐射温度快速升高。在 Z-pinch 驱动的动态黑腔中, 靶丸表面的辐射温度, 在极大值峰以前主要是由钨等离子体在内爆过程中所产生辐射向内传输而引起, 当它与硬泡沫层强烈碰撞时, 产生极大辐射峰, 此后辐射温度开始下降。明显地, 如果硬泡沫层适当向外移动, 使碰撞时刻提前, 则两条温度曲线更接近。此外, 还可以通过调整硬泡沫层的密度分布和几何构型, 进一步调整靶丸感受到的辐射温度波形。

为了更清晰地看到动态黑腔中各材料层的网格划分、靶丸压缩和辐射温度分布演化的整体情况, 图 15 给出了等离子体在强烈碰撞前后四个时刻辐射温度空间分布的伪色彩图。可以看到, 靶丸在强烈碰撞前就被辐射烧蚀, 出现了外铍层向外膨胀, 内铍层向内压缩, 辐射能量向靶丸内部传输的态势; 由于靶丸外、z 轴附近的等离子体更容易被压缩, 从而受冲击波压缩得更紧, 使得靶丸外对称轴附近的辐射温度更高; 本模型中靶丸最终的压缩对称性不是很好, 今后需要在本文获得的物理认识基础上, 进一步对靶丸结构、辐射场调控措施等进行优化设计。

2 四种动态黑腔构型模拟结果的对比分析

前面, 我们对钨等离子体壳和中心软泡沫柱组成的简单动态黑腔, 以及在其软泡沫柱外嵌套硬泡沫层、在其软泡沫柱中心嵌入结构靶丸和同时在其软泡沫柱内外嵌套上靶丸和硬泡沫层等四种构型动态黑腔的内爆动力学行为和热力学性能分别进行了模拟研究和比较分析。这里重点比较分析靶丸(或虚构靶丸)表面上辐射温度的变化差异, 以进一步明确硬泡沫层对动态黑腔辐射性能的影响, 以及动态黑腔和靶丸的耦合关系和相互影响。图 16 是这四种情况的交叉比较。图 16(a) 和图 16(b) 是在没有和有靶丸的情况下, 观察嵌套硬泡沫层对追踪物质点辐射温度的影响变化。图中曲线清晰地表明, 不管是有或没有靶丸, 在软泡沫柱外嵌套上硬泡沫层后, 靶丸(或虚构

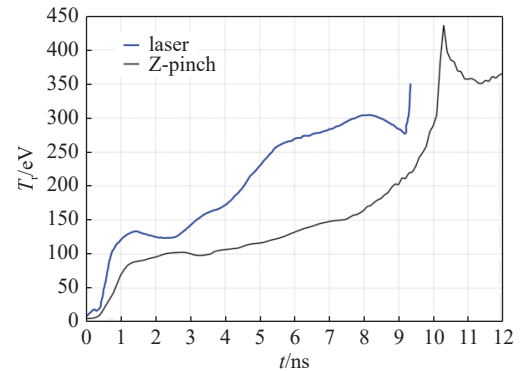


Fig. 14 Comparison between the hohlraum radiation temperature of NIF (data from Fig.1 in Ref. [2]) and the radiation temperature, which is received by the capsule in the Z-pinch dynamic hohlraum with an embedded hard foam layer, at 90° from z-axis

图 14 NIF 上的黑腔辐射温度(文献 [2] 中图 1)波形与 Z 箍缩动态黑腔中靶丸感受到的辐射温度(90°方向)变化的比较

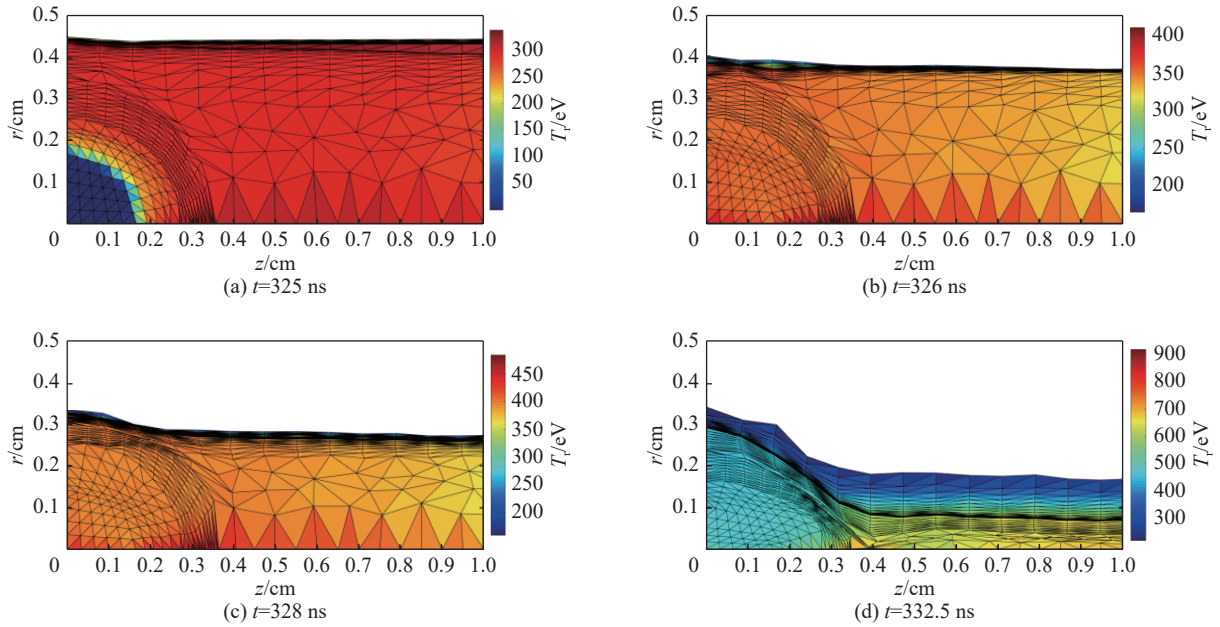


Fig. 15 Color contour maps of radiation temperature distribution in the simulated domain in the dynamic hohlraum with a capsule and a hard foam (CH) layer

图 15 有靶丸和硬泡沫层情况下, 模拟区域中辐射温度在几个特征时刻的空间分布伪色彩图

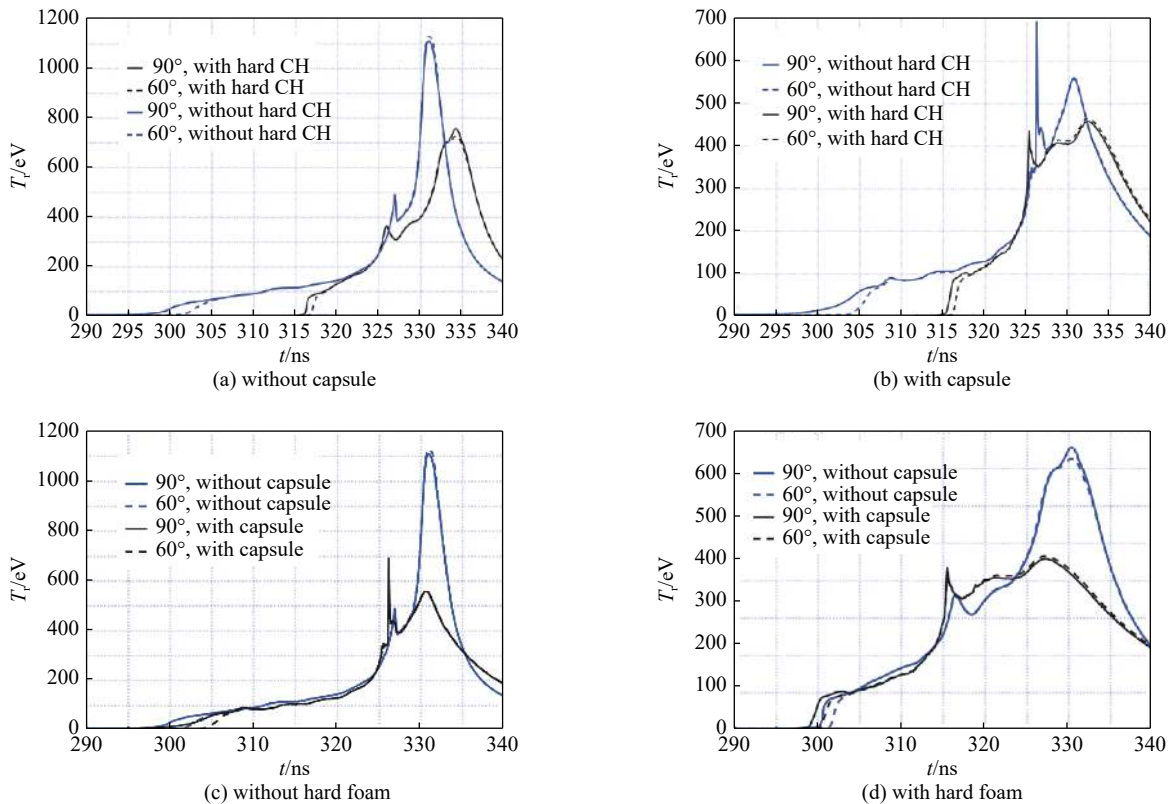


Fig. 16 Time variations of the radiation temperature of two mass points, which are located in a circle of radius 0.3 cm

图 16 半径为 0.3 cm 的球面上两个物质点的辐射温度随时间的变化

靶丸)表面上感受到的辐射场推后, 并且靶丸表面的辐射温度上升更快, 辐射场均匀更快, 还有整个辐射场温度下降了, 特别是靶丸感受到的第一个辐射峰明显下降了(而时刻稍为提前), 使得靶丸感受到的辐射温度变化更平滑, 波形更接近于 NIF 成功点火实验中靶丸等熵压缩的黑腔辐射温度曲线^[1-3]。图 16(c)和图 16(d)是在没有和有硬泡沫层的情况下, 观察在软泡沫柱中心嵌套靶丸后对追踪物质点辐射温度的影响变化。图中曲线清楚地表明, 嵌套上靶丸后, 靶丸表面将感受到更强的第一辐射峰, 并且峰值时刻也稍为提前; 但在没有硬泡沫层情况下,

无靶丸时追踪观察点的辐射温度上升得快一点,而在有硬泡沫层情况下,有靶丸时追踪观察点的辐射温度上升得迅速一点。总之,在动态黑腔中装上靶丸后,在靶丸烧蚀内爆关注的主要时间段内,辐射温度是升高的(其他时间段下降),这有利于辐射驱动聚变的实现,或者说腔靶耦合是有利于靶丸烧蚀内爆聚变的。

3 结 论

Z 箍缩应用可以直接利用它的内爆动能(如对材料的冲击效应),也可以利用其内爆动能被滞止热化后产生的强 X 光辐射能。动态黑腔是利用 Z 箍缩强 X 光辐射能的重要途径,它既可以应用于材料辐射性质研究,也可以应用于惯性约束聚变研究。对 Z 箍缩辐射的惯性约束聚变而言,动态黑腔是重要的桥梁,它为惯性约束聚变靶丸提供均匀、对称的烧蚀内爆辐射场。在嵌入靶丸的情况下,特别是靶丸烧蚀层的受热膨胀,会对 Z 箍缩内爆等离子体与能量转换体的碰撞以及它们后续的运动状态产生比较大的影响,因此,应该说靶丸也是动态黑腔构成的一部分,对黑腔辐射场,特别是靶丸自身感受到的辐射场(烧蚀温度)产生不可忽视的影响。

本文在点火级驱动电流下,利用二维辐射磁流体力学程序对四种动态黑腔构型进行了比较研究。给出了它们的内爆流线和对应的 X 光功率变化曲线,它们清晰地反映了动态黑腔形成中冲击波的产生和传播过程,以及它们与 X 光辐射强弱的对应关系;各壳层等离子体动能及总动能随时间的变化,反映了等离子体的加速、碰撞、动能(能量)转移、整体再加速、膨胀飞散等物理过程;全域和各材料层的平均温度反映了动态黑腔体系全局和局部的热力学状态,以及动态黑腔的存在时间。针对动态黑腔辐射场的惯性约束聚变应用,着重追踪观察了靶丸(或虚构靶丸)表面物质的密度和辐射温度演变情况,并且对四种动态黑腔构型中的辐射温度进行了交叉比较。结果表明,在简单动态黑腔的软泡沫柱外嵌套上硬泡沫层,使靶丸感受到辐射温度开始升高的时刻大大延后,并且升高更快,也更快变得均匀,从而可以避免聚变靶丸过早、过长时间的预热;使靶丸感受到的第一辐射峰大大减低,减轻强烈辐射峰对靶丸的冲击;使靶丸感受到的第一辐射峰稍为提前,黑腔辐射场对靶丸烧蚀内爆的有效时间变长。在软泡沫柱中心嵌套入聚变靶丸后,使靶丸在烧蚀后期感受到的有效辐射温度提高,时刻也稍为提前,表明腔靶耦合有利于靶丸烧蚀内爆。在本文的模拟中,在嵌套有硬泡沫层和靶丸的情况下,靶丸表面上的辐射温度很快就达到均匀,存在三阶段上升的波形结构,有效黑腔辐射驱动时间达 10 ns 以上,后期辐射温度达到 300 eV 以上。比较接近美国 NIF 点火成功实验中的黑腔辐射温度波形。这些模拟结果增强了我们对 Z 箍缩惯性约束聚变成功的信心。

今后,我们要进一步优化动态黑腔构型,如改变硬泡沫层的位置和靶丸的半径等,缩小靶丸赤道表面和对称轴上极点感受到辐射温度升高的时间差,改善辐射驱动对称性,并且设法延长靶丸感受到第一辐射峰时刻与碰撞主冲击波达到靶丸表面时刻的时间差,为靶丸烧蚀内爆提供一个干净、安全的辐射场。此外,还要考察和完善物理模型,以及所使用的状态方程和辐射参数,使模拟结果在定量上更可靠。

参考文献:

- [1] Tollefson J, Gibney E. Nuclear-fusion lab achieves 'ignition': what does it mean?[J]. *Nature*, 2022, 612(7941): 597-598.
- [2] Abu-Shawareb H, Acree R, Adams P, et al. Lawson criterion for ignition exceeded in an inertial fusion experiment[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129: 075001.
- [3] Kritcher A L, Zylstra A B, Callahan D A, et al. Design of an inertial fusion experiment exceeding the Lawson criterion for ignition[J]. *Physical Review E*, 2022, 106: 025201.
- [4] Zylstra A B, Kritcher A L, Hurricane O A, et al. Experimental achievement and signatures of ignition at the National Ignition Facility[J]. *Physical Review E*, 2022, 106: 025202.
- [5] Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Physics of Plasmas*, 1995, 2(11): 3933-4024.
- [6] Lan Ke, Liu Jie, Lai Dongxian, et al. High flux symmetry of the spherical hohlraum with octahedral 6LEHs at the hohlraum-to-capsule radius ratio of 5.14[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 010704.
- [7] Lan Ke. Dream fusion in octahedral spherical hohlraum[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2022, 7: 055701.
- [8] Huo Wenyi, Li Zhichao, Chen Yaohua, et al. First octahedral spherical hohlraum energetics experiment at the SGIII laser facility[J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120: 165001.
- [9] Li Xin, Dong Yunsong, Kang Dongguo, et al. First indirect drive experiment using a six-cylinder-port hohlraum[J]. *Physical Review Letters*, 2022, 128: 195001.
- [10] Leeper R J, Alberts T E, Asay J R, et al. Z pinch driven inertial confinement fusion target physics research at Sandia National Laboratories[J]. *Nuclear Fusion*, 1999, 39(9Y): 1283-1294.
- [11] Nash T J, Derzon M S, Chandler G A, et al. High-temperature dynamic hohlraums on the pulsed power driver Z[J]. *Physics of Plasmas*, 1999, 6(5): 2023-2029.

- [12] Bailey J E, Chandler G A, Slutz S A, et al. X-ray imaging measurements of capsule implosions driven by a Z-pinch dynamic hohlraum[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89: 095004.
- [13] Rochau G A, Bailey J E, Maron Y, et al. Radiating shock measurements in the Z-pinch dynamic hohlraum[J]. *Physical Review Letters*, 2008, 100: 125004.
- [14] Bailey J E, Chandler G A, Mancini R C, et al. Dynamic hohlraum radiation hydrodynamics[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13: 056301.
- [15] 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.
- [16] Ruiz C L, Cooper G W, Slutz S A, et al. Production of thermonuclear neutrons from deuterium-filled capsule implosions driven by Z-pinch dynamic hohlraums[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93: 015001.
- [17] 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.
- [18] 蒋树庆, 甯家敏, 陈法新, 等. Z箍缩动态黑腔动力学及辐射特性初步实验研究[J]. *物理学报*, 2013, 62: 155203. (Jiang Shuqing, Ning Jiamin, Chen Faxin, et al. Preliminary experimental study on implosion dynamics and radiation character of Z-pinch dynamic hohlraum[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62: 155203)
- [19] Huang Xianbin, Ren Xiaodong, Dan Jiakun, et al. Radiation characteristics and implosion dynamics of Z-pinch dynamic hohlraums performed on PTS facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 092704.
- [20] Chu Y Y, Wang Z, Qi J M, et al. Numerical performance assessment of double-shell targets for Z-pinch dynamic hohlraum[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2022, 7: 035902.
- [21] 吴福源, 褚衍运, 叶繁, 等. Z箍缩动态黑腔形成过程MULTI程序一维数值模拟[J]. *物理学报*, 2017, 66: 215201. (Wu Fuyuan, Chu Yanyun, Ye Fan, et al. One-dimensional numerical investigation on the formation of Z-pinch dynamic hohlraum using the code MULTI[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66: 215201)
- [22] Mao Chongyang, Wen Wu, Xiao Delong, et al. Analytical physical models for cryogenic double-shell capsule design driven by Z-pinch dynamic Hohlraum[J]. *Physics of Plasmas*, 2021, 28: 092706.
- [23] Chen Shijia, Ma Yanyun, Wu Fuyuan, et al. Simulations on the multi-shell target ignition driven by radiation pulse in Z-pinch dynamic hohlraum[J]. *Chinese Physics B*, 2021, 30: 115201.
- [24] Ramis R, Meyer-ter-Vehn J, Ramirez J. MULTI2D—a computer code for two-dimensional radiation hydrodynamics[J]. *Computer Physics Communications*, 2009, 180(6): 977-994.
- [25] Ning Cheng, Chen Zhongwang. 2-D numerical investigation of the formation of Z-pinch-driven dynamic hohlraum at 8-MA current level[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(11): 3794-3804.
- [26] 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)
- [27] 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[J]. *物理学报*, 2014, 63: 125208. (Ning Cheng, Feng Zhixing, Xue Chuang. Basic characteristics of kinetic energy transfer in the dynamic hohlraums of Z-pinch[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63: 125208)