

靶丸支撑结构对低温靶温度特性影响研究

李黎, 李翠, 赵小迪, 胡孟华, 傅智莹, 厉彦忠

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对支撑结构的引入对靶丸温度分布产生扰动这一问题, 建立带不同靶丸支撑结构的三维低温靶模型, 基于离散坐标辐射模型和 Boussinesq 假设, 研究了支撑结构对靶丸温度特性的影响, 并对比了不同支撑结构靶丸温差对黑腔内氦气压力变化的敏感程度, 最后针对泡沫垫衬薄膜支撑研究了泡沫材料参数的影响规律。结果表明: 支撑膜能显著降低黑腔内自然对流强度, 薄膜支撑与两极支撑靶丸温度均匀性优于无支撑膜的充气管支撑和支撑杆支撑, 薄膜支撑相比两极支撑靶丸温度均匀性略高; 充气管直径越大, 靶丸温度均匀性越差。基准工况下, 薄膜支撑靶丸外表面最大温差最小, 温度均匀性最好, 两极支撑、充气管支撑及支撑杆支撑最大温差较薄膜支撑分别增大了 5.92%、32.71% 及 17.99%; 氦气压力升高, 靶丸外表面温度均匀性逐渐恶化, 薄膜支撑和两极支撑靶丸温差对氦气压力变化的敏感度更低; 对于泡沫垫衬薄膜支撑, 通过选用导热系数较大的泡沫材料并减小其厚度可获得较好的靶丸温度均匀性。该计算结果可为靶丸支撑结构的工程设计提供一定的理论支撑。

关键词: 低温靶; 支撑结构; 温度特性; 数值模拟

中图分类号: TB661 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202305015 **文章编号:** 0253-987X(2023)05-0149-10

Thermal Characteristics of Cryogenic Target with Different Types of Capsule Supports

LI Li, LI Cui, ZHAO Xiaodi, HU Menghua, FU Zhiying, LI Yanzhong

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this study, three-dimensional cryogenic target models are established based on the discrete ordinates radiation model and Boussinesq hypothesis to investigate the perturbations of capsule thermal distribution caused by the use of capsule supports. Variations of temperature and flow field distributions as well as the sensitivity to helium pressure in hohlraum with different capsule supports are obtained. Finally, the influence of foam material parameters of the foam shell support is investigated. The results show that the targets using tent and polar tent supports have more uniform capsule temperature distribution than those with the fill-tube support and rod support as a result of the weakened natural convection inside the hohlraum. The tent support is more effective than the polar tent support due to its better film arrangement. For the two types of non-film supports, the pure fill-tube support provides the worst temperature uniformity due to its larger fill-tube diameter when compared with the rod support. Under typical operating condi-

tions, the capsule with tent support has the smallest maximum temperature difference of 2.45 mK; the maximum temperature differences of the capsule with the polar tent support, fill-tube support and rod support are 5.92%, 32.71% and 17.99% higher, respectively. Moreover, the temperature uniformity deteriorates with the increase of helium pressure for the four support types. The temperature uniformity of the tent support and polar tent support is less sensitive to the helium pressure change. For the foam shell support, a more uniform capsule temperature distribution can be obtained by choosing a foam shell with higher thermal conductivity and smaller thickness. The calculation results can serve as a theoretical basis to some extent for the engineering design of the capsule support.

Keywords: cryogenic target; capsule supports; temperature characteristic; numerical simulation

在能源及环境问题日渐凸显的今天,可控热核聚变有望能为人类提供一种清洁、高效且安全的能源获取方式。惯性约束核聚变(ICF)作为最有希望实现可控热核聚变的技术方案之一^[1-2],成为大国的研究重点。ICF是指等离子态的热核燃料在烧蚀层剩余质量的惯性约束下,发生核聚变反应并释放聚变能^[3]。靶是ICF实现点火的关键部件,凭借优越的内爆性能,低温靶成为了研究ICF的重点^[4-6]。2021年8月,美国国家点火装置(NIF)实现了超过1.3 MJ的能量产量,比NIF 2018年的产量记录增加了25倍,站在了聚变点火的门槛上。

为了实现热核点火,靶丸内部形成的燃料冰层质量必须满足要求:冰层厚度均匀性应超过99%,表面粗糙度应小于1 μm ,以抑制Rayleigh-Taylor不稳定性^[7-9]。靶丸周围的热环境是决定冰层质量的关键因素,因此对于低温靶的靶丸温度均匀性的控制十分重要。靶的自身结构以及黑腔内氦气自然对流等都会影响靶丸温度分布^[10-14]。为确保内爆过程中的对称性,靶丸需精确位于黑腔中心,通常依靠两层聚合物薄膜使其固定,此外用于燃料填充的充气管也对靶丸起到了一定的支撑作用。近年来经过研究发现,靶丸支撑膜的存在会导致流体力学不稳定性增长,降低中子产额,从而严重影响靶丸内爆性能^[15-17]。为了消除或缓解支撑膜的影响,一些新的靶丸支撑方案被提出^[18-22]:一类是在支撑膜的基础上进行改进,包括减小膜的厚度、用一层低密度泡沫包裹靶丸以及两极接触支撑技术等;另一类则完全取消支撑膜,包括仅依靠充气管支撑、充气管加支撑杆、四边形纳米丝支撑以及磁悬浮靶丸等技术。文献[19-24]研究了各种支撑结构对靶丸内爆性能的影响,但均不涉及对靶丸温度特性的研究。

本文建立不同靶丸支撑结构低温靶三维模型,

利用Fluent数值模拟研究了支撑结构对低温靶温度特性的影响,分析对比了不同氦气压力下支撑结构的影响,最后针对新型泡沫垫衬薄膜支撑,研究了泡沫材料参数的影响规律,从而为支撑方案的选择提供一定的指导。

1 数值模型建立

1.1 物理模型

本文建立的低温靶结构^[25]如图1所示。靶主要包括铜套筒、诊断带、压膜环、靶丸、支撑膜以及充气管等结构。铜套筒由上下半腔组合而成,内壁镀金,厚度为0.01 mm,外表面冷环处为与硅冷臂的装配面,是系统的冷量来源;套筒内部形成柱形黑腔,黑腔内填充一定压力氦气;黑腔上下两端开设用于打靶的激光入射口(LEH),并由半透明的聚合物薄膜进行密封;靶丸由支撑膜固定于黑腔中心,由内部的氘气(DT)气体、中间的DT冰层以及最外层的烧蚀体构成;由石英玻璃制成的充气管插入靶丸以进行燃料填充。为屏蔽来自环境的热辐射,靶整体位于内部为真空环境的低温屏蔽罩内,罩上分布5个窗口。

为研究靶丸支撑结构的影响,本文首先针对4种不同支撑结构分别进行计算。第1种如图1(b)所示,称为薄膜支撑。第2种如图2(a)所示,通过改变膜的布置方式,减小了膜与靶丸接触面积,使得膜与靶丸仅在南北两极附近接触,故称为两极支撑。第3种如图2(b)所示,为仅依靠充气管支撑,此时需要更大直径的充气管才能保证支撑的牢固性。第4种如图2(c)所示,该结构依靠支撑杆与充气管组成悬臂式结构对靶丸进行支撑,称为支撑杆支撑。支撑杆是由高强度材料SiC制成的实心圆杆,位于充气管下方垂直于充气管方向,水平方向偏离靶丸的距离为200 μm 。不同支撑结构的尺寸参数见表1。

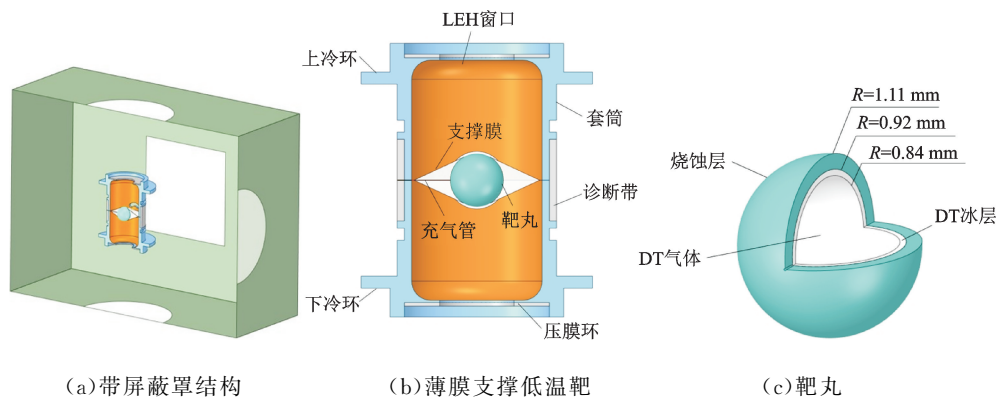


图 1 低温靶结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cryogenic target structure

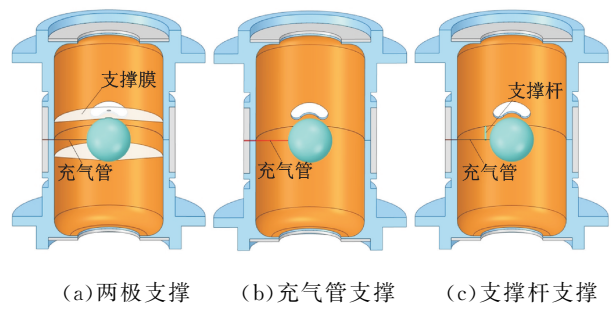


图 2 不同支撑结构低温靶模型

Fig. 2 Cryogenic target models with different capsule supports

表 1 不同支撑结构的尺寸参数

Table 1 Size parameters of different capsule supports

支撑结构	充气管内径/ μm	充气管外径/ μm	支撑杆直径/ μm
薄膜支撑	6	10	
两极支撑	6	10	
充气管支撑	22	30	
支撑杆支撑	6	10	12

为了便于展示靶丸温度分布,在其外表面定义了两条特征曲线,如图 3 所示,其中红线称为靶丸竖直线,绿线称为靶丸赤道线。

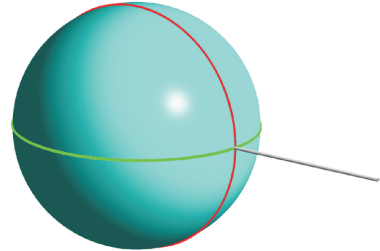


图 3 靶丸外表面特征线

Fig. 3 Characteristic lines on the outer surface of capsule

1.2 控制方程和边界条件

本文中涉及的计算均为稳态计算,稳态工况下质量守恒方程、动量方程和能量方程如下

$$\nabla(\rho \mathbf{u}) = 0$$
$$\nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} [1 - \beta(T - T_{\text{ref}})]$$

$$\rho c_p \mathbf{u} \nabla T = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \varphi$$

式中: ρ 、 $\mathbf{u}$ 、 p 、 T 分别为密度、速度矢量、压力以及温度; μ 、 β 、 c_p 、 λ 分别为气体的动力黏度、热膨胀系数、比定压热容及导热系数; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; T_{ref} 为参考温度; φ 为能量源项。对气体密度采用 Boussinesq 假设以模拟气体的自然对流效应。因为模拟中涉及半透明介质的辐射问题,辐射模型采用离散坐标(DO)模型。

基准工况的边界条件为:低温屏蔽罩为恒定温度 120 K,表面发射率为 1,罩上窗口为半透明边界,受到常温环境 300 K 的辐射;冷环为 18.5 K 定温边界;黑腔内填充氦气压力为 20 kPa;激光入射口及表征孔封口膜透射率为 0.005,靶丸支撑膜透射率为 1;套筒表面发射率为 0.02,诊断带及压膜环表面发射率为 0.04,靶丸视为黑体,发射率为 1;由于氦 β 衰变过程放热,DT 冰层和 DT 气体具有的体积热源分别为 $49\ 100\ \text{W}/\text{m}^3$ 、 $50\ \text{W}/\text{m}^3$ 。

1.3 网格无关性验证

采用 Fluent meshing 软件对建立的低温靶模型进行网格划分。为确保模拟结果的准确性,以靶丸外表面最大温差为判定依据,分别对 4 种不同支撑结构低温靶模型进行网格无关性验证,结果如图 4 所示。对于薄膜支撑、两极支撑、充气管支撑以及支撑杆支撑模型,本文最终分别选取 248 万、231 万、174 万及 349 万网格数进行计算。

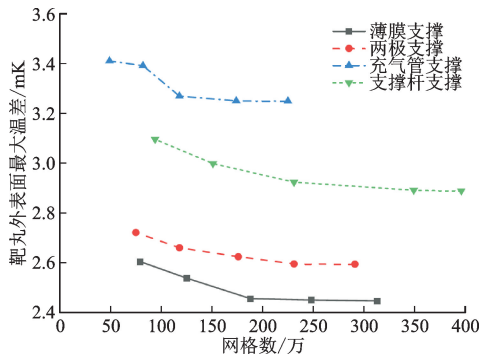


图 4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid-independence verification

2 计算结果与分析

2.1 支撑结构影响分析

针对基准工况下 4 种不同靶丸支撑结构低温靶模型计算结果进行分析。图 5 给出了不同支撑结构

黑腔内流场分布情况。对比分析可知充气管支撑与支撑杆支撑黑腔内流场分布基本相似;靶丸周围氦气在来自靶丸的热量加热下,因浮升力作用上升,在顶部遇到温度较低的黑腔内壁面因重力作用下降,从而在黑腔内形成了对流循环,这种对流效应会影响靶丸温度均匀性;由于支撑杆的引入,支撑杆支撑在其表面处形成了流动滞止区,但由于支撑杆的尺寸十分微小,对腔内流场整体的扰动很弱。薄膜支撑和两极支撑黑腔内氦气域被支撑膜分割为上、中、下 3 个区域,使得靶丸与来自上下区域内的流动分离开来,更重要的是,中部靶丸附近氦气被分割为较小区域,阻碍了受到靶丸加热的氦气在浮升力作用下向上流动,使得该区域内流速显著降低。薄膜支撑与两极支撑相比,后者中部区域特征尺度更大,因此该区域内流速更大,前者中部区域内流动十分微弱,而后者则形成了较为明显的对流循环。

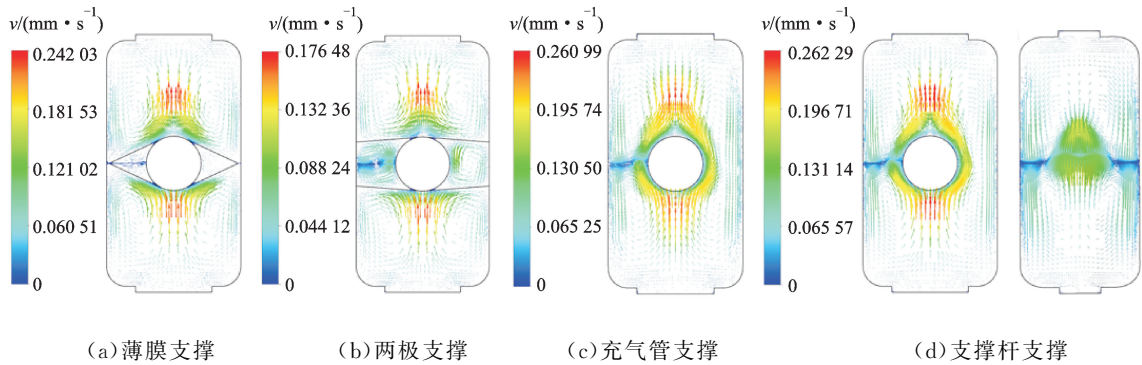


图 5 不同支撑结构下黑腔内流场分布

Fig. 5 Flow field distribution in the hohlraum under different capsule supports

图 6 为不同支撑结构氦气最大流速对比。对于充气管支撑和支撑杆支撑,中部最大流速采用靶丸直径高度区域内最大流速。其中充气管支撑和支撑杆支撑最大流速相差不大,这是因为充气管、支撑杆等尺寸微小,对流场的影响很小;薄膜支撑与两极支撑中流域受到膜的分割,自然对流被削弱,黑腔内最大流速分别降低了 8.30% 及 32.26%。此外薄膜支撑中膜的布置方式使得其中部区域对流显著减弱,最大流速仅为 0.028 mm/s,两极支撑的最大流速为 0.108 mm/s,效果差于前者。

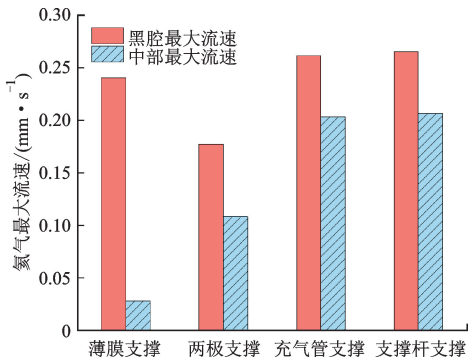


图 6 不同支撑结构下氦气最大流速对比

Fig. 6 Comparison of maximum helium flow rate under different capsule supports

不同支撑结构靶丸外表面温度云图如图 7 所示。可见靶丸温度分布相似,均为南北两极温度高、赤道温度低,这是由于柱形黑腔的影响,靶丸赤道处到黑腔内壁面传热路径短于南北两极,且南北两极直接受到来自激光入射口的外界辐射。由于充气管的传热性能优于氦气,故靶丸外表面温度最低点位

于赤道附近与充气管连接处。对比可知,薄膜支撑与两极支撑靶丸赤道附近温度明显高于充气管支撑和支撑杆支撑,其中薄膜支撑最高,这是因为其黑腔内中部区域自然对流被显著削弱。

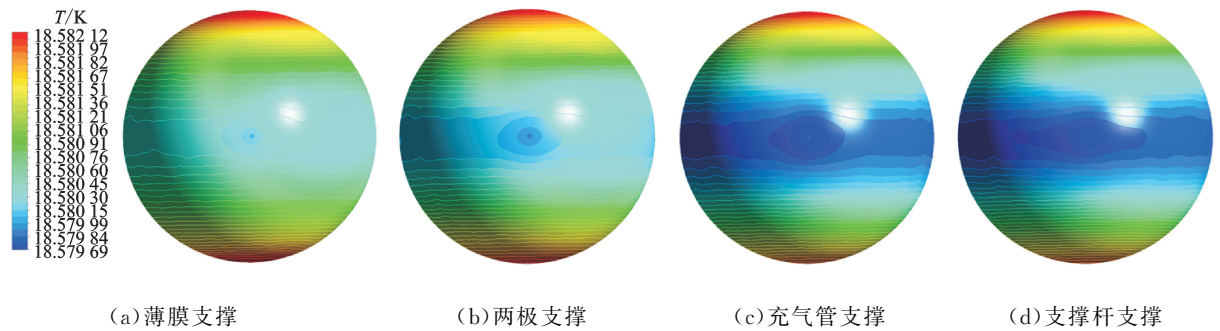


图 7 不同支撑结构下靶丸温度云图

Fig. 7 Temperature contours of capsule under different capsule supports

为了更清楚地对比靶丸温度的变化,图 8 给出了不同支撑结构靶丸特征线上的温度分布。

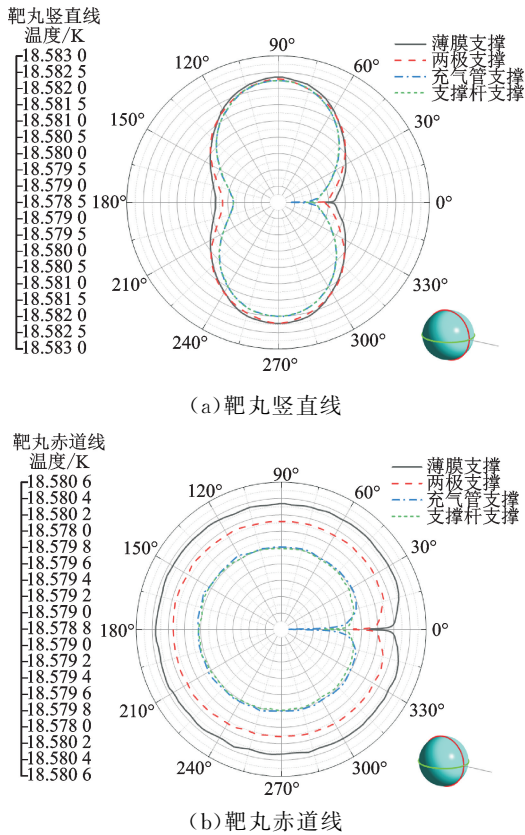


图 8 靶丸外表面特征线温度

Fig. 8 Temperature distribution of the characteristic lines on the outer surface of capsule

图 8 中,对于靶丸竖直线,极坐标角度 0° 与 180° 对应赤道,其中 0° 为靶丸外表面与充气管连接处, 90° 对应靶丸北极点, 270° 对应靶丸南极点;对于靶丸赤道线, 0° 为靶丸外表面与充气管连接处。由图 8 可知,充气管支撑和支撑杆支撑靶丸外表面温度整体相差不大,表明支撑杆对靶丸温度的影响很小,

但前者具有更大尺寸的充气管,热阻更小,故其温度最低值远低于后者。相比之下,薄膜支撑和两极支撑靶丸温度较充气管支撑及支撑杆支撑有所上升,且赤道附近温度上升幅度更大,这是由于支撑膜削弱了氦气的自然对流,靶丸与套筒间的换热被减弱,而靶丸赤道附近中部区域内对流强度降幅更大。薄膜支撑和两极支撑两者的温度差异主要在靶丸赤道附近,由图 6 可知,由于前者中部区域内靶丸附近氦气流速明显低于后者,换热更弱,因此靶丸赤道附近温度较后者有所抬升。自然对流导致靶丸南北两极温度不同,北极由于重力与流向冷却环的热流方向相反,对流反而使换热阻力增加,而南极重力与流向冷环热流方向相同,换热阻力减小^[10-12],故靶丸北极温度更高。薄膜支撑和两极支撑结构中自然对流得到削弱,南北两极的温度差异也相应减小。

为了更直观地体现靶丸外表面的温度均匀性,将特征线上的温度分布转换为过剩温度,结果如图 9 所示。过剩温度为特征线上的温度减去最低温度。由图 9 可知,靶丸竖直线上存在支撑膜的薄膜支撑和两极支撑,温度均匀性明显优于充气管支撑和支撑杆支撑,其中薄膜支撑温度均匀性最好,充气管支撑最差。总的来说是因为支撑膜能够削弱黑腔内自然对流,抬升靶丸赤道附近温度,缩小其与南北两极温度差异,而薄膜支撑结构中膜的布置方式使得中部区域内靶丸附近流速降低得更为显著,靶丸赤道附近温度上升幅度更大,与南北两极差异更小,故温度均匀性最好。由于具有更大尺寸的充气管,充气管支撑温度最低值远低于其他结构,故温度均匀性最差。靶丸赤道线上薄膜支撑、两极支撑及支撑杆支撑的温度均匀性相差不大,表明支撑膜主要影响靶丸竖直线上的温度均匀性,同样充气管支撑温度均匀性最差。

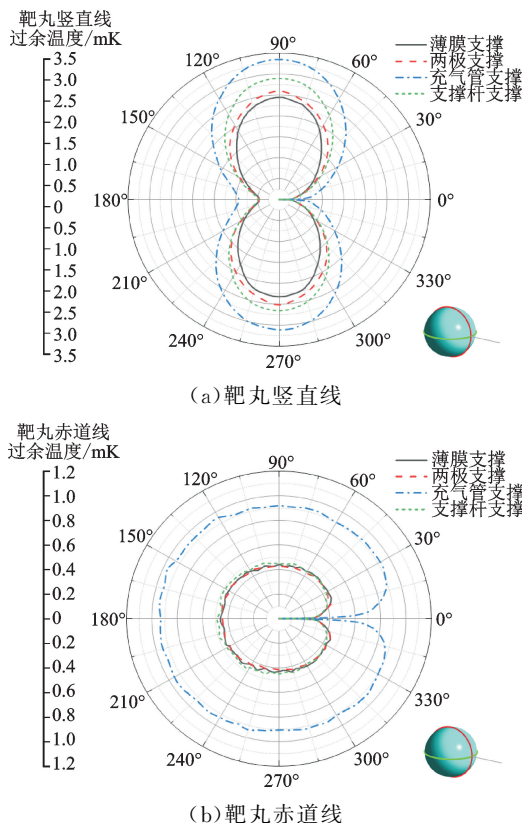


图 9 靶丸外表面特征线过剩温度

Fig. 9 Excess temperature distribution of the characteristic lines on the outer surface of capsule

图 10 为不同支撑结构下靶丸外表面温度对比情况,其中充气管支撑和支撑杆支撑平均温度几乎一致,相比之下,两极支撑上升约 0.27 mK,薄膜支撑上升约 0.37 mK,温度最高;对于靶丸表面最大温差,薄膜支撑最小,为 2.45 mK,两极支撑、充气管支撑及支撑杆支撑较薄膜支撑最大温差分别增大了 5.92%、32.71%及 17.99%。由靶丸外表面最大温差值也可得出薄膜支撑靶丸温度均匀性最好,充气管支撑最差。

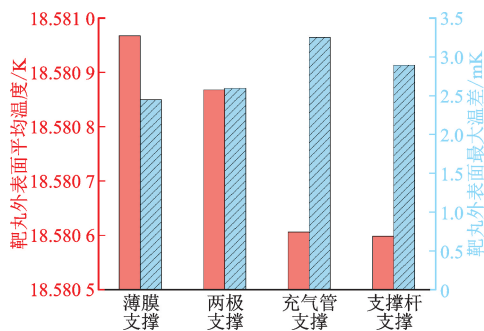
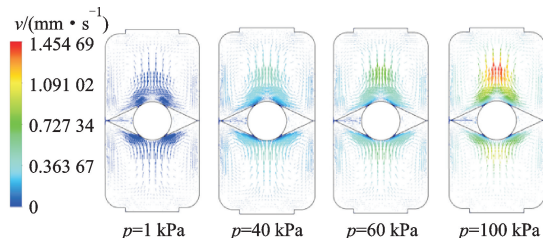


图 10 不同支撑结构靶丸表面温度对比

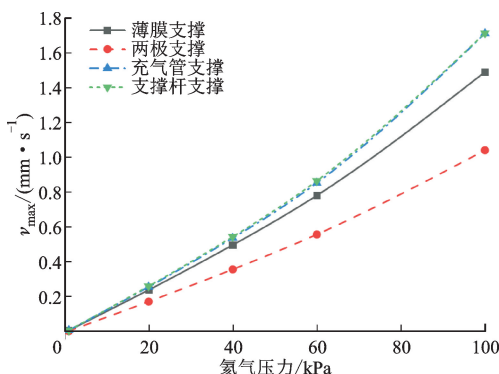
Fig. 10 Comparison of capsule surface temperature under different capsule supports

2.2 不同氦气压力下支撑结构的影响

为了防止激光照射到黑腔内壁时形成的等离子体扩散以及传导来自靶丸的热量,黑腔需填充一定压力的氦气。氦气的压力直接影响靶丸与套筒间的换热效果,进而影响靶丸的温度均匀性。为了研究不同支撑结构下靶丸温度对氦气压力变化的敏感性,本文模拟了 1、20、40、60 以及 100 kPa 等 5 种工况,其余边界条件同基准工况。以薄膜支撑为例,黑腔内流场分布随氦气压力的变化如图 11(a)所示。图 11(b)给出了各支撑结构黑腔内最大流速随氦气压力的变化。随着氦气压力升高,最大流速均呈增大趋势,自然对流显著增强,其中充气管支撑和支撑杆支撑变化趋势基本一致,流速上升幅度大于薄膜支撑和两极支撑,这是由于支撑膜对流域的分割导致的,其中两极支撑结构中流域相对来说被分割得更均匀,故流速上升幅度最小。



(a) 薄膜支撑黑腔流场分布

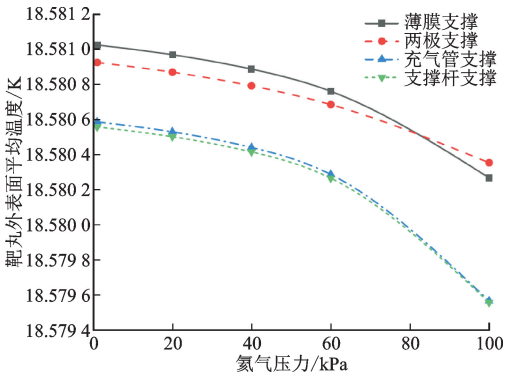


(b) 黑腔内最大流速

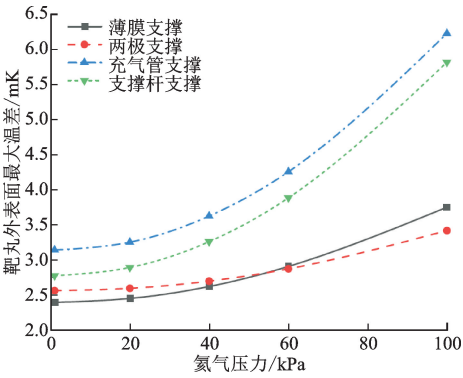
图 11 不同支撑结构下黑腔内流动随氦气压力变化
Fig. 11 Variation of flow in the hohlraum with helium pressure under different capsule supports

图 12 为不同支撑结构下靶丸温度随氦气压力变化曲线。随着氦气压力升高,靶丸外表面平均温度均逐渐降低,这是由于黑腔内自然对流增强,靶丸与套筒间的换热得到强化。与图 11 中氦气最大流速变化趋势相对应,薄膜支撑和两极支撑靶丸外表面平均温度对氦气压力变化的敏感性更低,其中两极支撑最低,故随着氦气压力的上升,薄膜支撑靶丸

外表面平均温度会低于两极支撑。



(a) 靶丸外表面平均温度



(b) 靶丸外表面最大温差

图 12 不同支撑结构下靶丸外表面温度随氦气压力变化
Fig. 12 Variation of capsule surface temperature with helium pressure under different capsule supports

图 12(b)所示,氦气压力上升时,靶丸外表面最大温差均逐渐增大,温度均匀性趋于恶化,这是自然对流逐渐增强造成的。氦气压力自 1 kPa 升至 100 kPa,薄膜支撑、两极支撑、充气管支撑及支撑杆支撑靶丸外表面最大温差分别增大了 56.70%、33.46%、98.24%及 109.63%。各支撑结构靶丸表面最大温差对氦气压力变化的敏感程度与图 11 中流速的上升幅度相对应,薄膜支撑和两极支撑的敏感程度远低于充气管支撑及支撑杆支撑,能够在较大氦气压力范围内维持相对较小的靶丸温差,其中两极支撑的敏感性最低。氦气压力超过 60 kPa 时,薄膜支撑靶丸外表面最大温差会超越两极支撑(靶丸外表面最大温差来自靶丸北极与赤道充气管处),因为随着氦气压力的上升,黑腔内自然对流增强,如图 13 所示,靶丸北极与赤道温度差异逐渐增大,受支撑膜布置方式的影响,薄膜支撑上部区域特征尺度更大,自然对流增幅相应更大,此时其靶丸北极与赤道的温度差异更大。

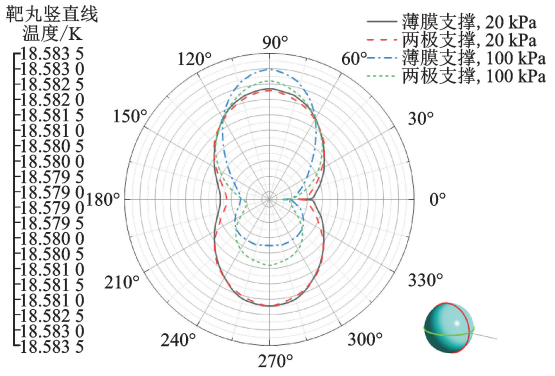


图 13 薄膜支撑和两极支撑不同氦气压力下靶丸竖直线温度对比

Fig. 13 Comparison of vertical characteristic line temperature of capsule under different helium pressure with tent and polar tent

2.3 泡沫垫衬薄膜支撑

由上述可知,支撑膜能够削弱黑腔内自然对流,提升靶丸温度均匀性,且能够降低靶丸温差对氦气压力变化的敏感性。在靶丸内爆过程中,支撑膜会在靶丸表面引发较大的面密度扰动,并在瑞利-泰勒不稳定性增长机制作用下被显著放大,导致中子产额减少,降低内爆性能^[15-17]。在工程应用中可通过减小膜的厚度^[15-16]及采用上文中的两极支撑^[19,21]减小膜与靶丸的接触面积来减轻膜的扰动,此外在上文薄膜支撑基础上,可通过用一层低密度(30 mg/cm^3) SiO_2 泡沫包裹靶丸,使得薄膜仅与泡沫接触,以降低薄膜对靶丸内爆性能的影响^[21-22],如图 14 所示。靶丸直径为 d_i ;泡沫层外径为 d_o ; h_o 为表面换热系数。研究了泡沫材料的参数对靶丸温度特性的影响,从而为新的泡沫垫衬薄膜支撑方式提供预判。

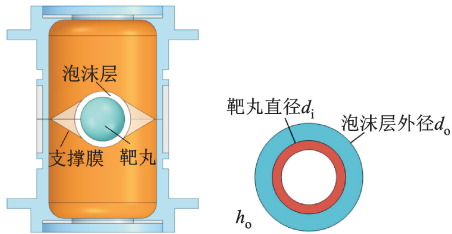


图 14 泡沫垫衬薄膜支撑示意图

Fig. 14 Schematic diagram of foam shell support

图 15 给出了泡沫层厚度为 $200\text{ }\mu\text{m}$ 时,靶丸温度随泡沫等效导热系数的变化规律。由图 15 可知,靶丸外表面平均温度和最大温差均随泡沫导热系数

增大呈降低趋势。这是因为泡沫导热系数增大使得靶丸与套筒间热阻减小,故靶丸温度降低;另一方面泡沫层的热扩散率随其导热系数增大而增大,其内部温度扯平的能力相应增强,故与之相邻的靶丸表面最大温差逐渐降低。当泡沫导热系数超过 $0.018 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时,靶丸表面最大温差能够降低到 2.45 mK (薄膜支撑最大温差值) 以下。为确保靶丸温度均匀性,应尽量选用导热系数较大的泡沫材料。

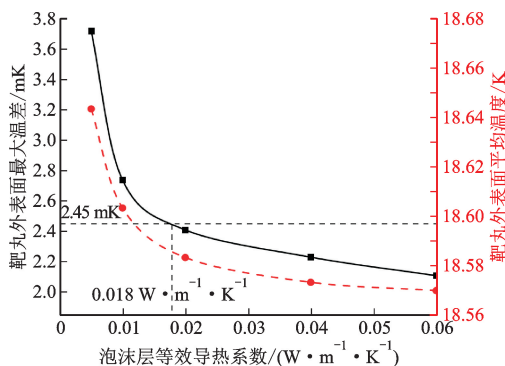


图 15 靶丸表面温度随泡沫导热系数变化

Fig. 15 Variation of capsule surface temperature with thermal conductivity of foam

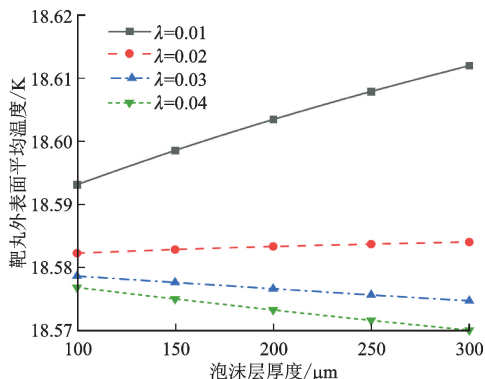
泡沫层厚度对靶丸温度特性的影响如图 16 所示。当泡沫层导热系数较小时,靶丸平均温度随泡沫层厚度的增加而上升,随着导热系数的增大,逐渐转变为随之下下降的趋势。这是因为增加泡沫层厚度会使泡沫层导热热阻增大,同时泡沫层的外表面积也增大,外部的对流传热热阻反而会减小,导热热阻增大程度与对流传热热阻减小程度的相对大小决定了总热阻的变化情况。临界绝缘直径^[26]对应总热阻最小的情况,其计算式如下

$$d_{o,c} = \frac{4\lambda}{h_o} \quad (4)$$

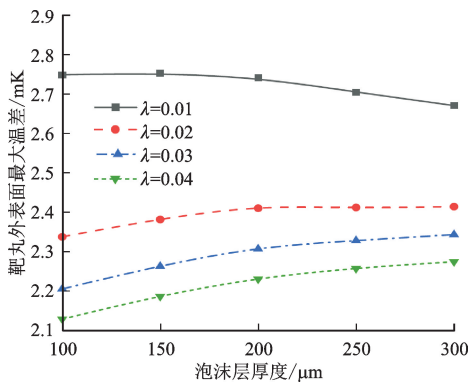
式中, λ 为泡沫材料导热系数。

当导热系数为 $0.01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 时, $d_{o,c} = 1.2 \text{ mm}$, 小于靶丸直径 $d_i = 2.22 \text{ mm}$, 故此时增加泡沫层厚度使得总热阻增大,靶丸与氦气换热被削弱,外表面平均温度上升;当泡沫导热系数逐渐增大时,临界绝缘直径随之增大, $\lambda = 0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, $d_{o,c} = 3.64 \text{ mm}$, 此时泡沫层外径远小于 3.64 mm , 增大泡沫层厚度使得总热阻减小,故靶丸外表面平均温度逐渐下降(但当泡沫层厚度增加至其外径大于 3.64 mm 后,继续增加泡沫层厚度又会使总热阻增大,靶丸外表面平均温度也随之升高)。靶丸外表

面最大温差的变化规律如图 16(b) 所示,随着导热系数的增大,最大温差随泡沫层厚度增加的变化规律由逐渐下降转变为逐渐上升,由图 16 可知,为提升靶丸表面的温度均匀性,应选用导热系数较大的泡沫材料且应尽量减小其厚度。



(a) 靶丸外表面平均温度



(b) 靶丸外表面最大温差

图 16 靶丸表面温度随泡沫层厚度的变化

Fig. 16 Variation of capsule surface temperature with foam layer thickness

3 结 论

本文利用数值模拟研究了不同靶丸支撑结构对黑腔内流场及靶丸温度场的影响规律,分析了不同支撑结构下靶丸表面温度对黑腔内氦气压力变化的敏感程度,针对泡沫垫衬薄膜支撑,研究了泡沫材料参数对靶丸温度的影响规律,得到的结论如下:

(1) 靶丸支撑膜及膜的布置方式会影响黑腔内的流场及靶丸表面温度分布:薄膜支撑及两极支撑黑腔内自然对流更弱,靶丸温度均匀性更好;受膜的布置方式影响,两极支撑靶丸温度均匀性略差于薄膜支撑。充气管尺寸会影响靶丸外表面最低温度,进而影响靶丸温度均匀性,具有更大尺寸充气管的充气管支撑温度均匀性最差。基准工况下,薄膜支撑靶丸外表面最大温差最小,为 2.45 mK ,温度均匀

性最好,两极支撑、充气管支撑和支撑杆支撑最大温差较薄膜支撑分别增加了 5.92%、32.71% 和 17.99%。

(2)氦气压力升高,黑腔内自然对流增强,靶丸外表面最大温差均随之增大,温度均匀性逐渐恶化。薄膜支撑和两极支撑靶丸温度均匀性对氦气压力变化的敏感性远低于充气管支撑和支撑杆支撑,能在较大氦气压力范围内获得相对较小的靶丸温差,两极支撑敏感性最低。

(3)对于新型泡沫垫衬薄膜支撑,其靶丸平均温度和最大温差均随泡沫导热系数的增大而减小,泡沫层厚度为 200 μm ,导热系数超过 0.018 W/(m·K)时,最大温差降低到 2.45 mK 以下。为提升靶丸温度均匀性,应选用导热系数较大的泡沫材料且尽量减小小泡沫层厚度。

参考文献:

- [1] 江少恩,丁永坤,缪文勇,等. 我国激光惯性约束聚变实验研究进展 [J]. 中国科学: G 辑 物理学 力学天文学, 2009, 39(11): 1571-1583.
JIANG Shaoen, DING Yongkun, MIAO Wenyong, et al. Recent progress of inertial confinement fusion experiments in China [J]. Science in China Series: G Physics, Mechanics & Astronomy, 2009, 39(11): 1571-1583.
- [2] 张杰. 浅谈惯性约束核聚变 [J]. 物理, 1999, 28(3): 142-152.
ZHANG Jie. An overview of inertial confinement fusion [J]. Physics, 1999, 28(3): 142-152.
- [3] CLARK D S, WEBER C R, KRITCHER A L, et al. Modeling and projecting implosion performance for the National Ignition Facility [J]. Nuclear Fusion, 2019, 59(3): 032008.
- [4] BACLET P, BACHELET F, CHOUX A, et al. Research program for the fabrication of the cryogenic target to reach ignition on the LMJ: results and prospects [J]. Fusion Science and Technology, 2006, 49(4): 565-573.
- [5] HURRICANE O A, CALLAHAN D A, CASEY D T, et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion [J]. Nature, 2014, 506(7488): 343-348.
- [6] 唐永建,蒋伟阳. ICF 低温冷冻靶制备技术进展 [J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(1): 156-161.
TANG Yongjian, JIANG Weiyang. Cryogenic targets fabrication methods for inertial confinement fusion [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(1):

156-161.

- [7] LONDON R A, KOZIOZIEMSKI B J, MARINAK M M, et al. Low mode control of cryogenic ICF fuel layers using infrared heating [J]. Fusion Science and Technology, 2006, 49(4): 608-615.
- [8] MARTIN M, GAUVIN C, CHOUX A, et al. A way to reach the cryogenic's temperature and roughness requirements for the laser megajoule facility [J]. Fusion Science and Technology, 2007, 51(4): 747-752.
- [9] MARTIN M, MOLL G, LALLET F, et al. With regard to the low mode target lifetime: an analytical model [J]. Fusion Science and Technology, 2011, 59(1): 166-170.
- [10] 黄鑫,彭述明,周晓松,等. 黑腔冷冻靶传热与自然对流的数值模拟研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(21): 215201-1-215201-8.
HUANG Xin, PENG Shuming, ZHOU Xiaosong, et al. Numerical simulation of heat transfer and natural convection of the indirect-driven cryogenic target [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(21): 215201-1-215201-8.
- [11] MOLL G, BACLET P, MARTIN M. Recent results in thermal and hydrodynamic simulations of cryogenic target for LMJ [J]. Fusion Science and Technology, 2006, 49(4): 574-580.
- [12] SANCHEZ J J, GIEDT W H. Thin films for reducing tamping gas convection heat transfer effects in a national ignition facility hohlraum [J]. Fusion Science and Technology, 2003, 44(4): 811-819.
- [13] 李翠,赵小迪,郭富城,等. 靶丸位置对冷冻靶物理场的影响规律研究 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(10): 123-130.
LI Cui, ZHAO Xiaodi, GUO Fucheng, et al. Effects of capsule sag and shift on the thermal environment of cryogenic target [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(10): 123-130.
- [14] 李翠,赵小迪,李黎,等. 微充气管残留燃料冰对冷冻靶控温过程的影响分析 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 50-57.
LI Cui, ZHAO Xiaodi, LI Li, et al. Influence of residual fuel ice in micro gas filling tube on the temperature control of ICF cryogenic target [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 50-57.
- [15] HAMMEL B A, TOMMASINI R, CLARK D S, et al. Simulations and experiments of the growth of the "tent" perturbation in NIF ignition implosions [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2016, 717(1): 012021.

- [16] NAGEL S R, HAAN S W, RYGG J R, et al. Effect of the mounting membrane on shape in inertial confinement fusion implosions [J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(2): 022704.
- [17] MEEZAN N B, EDWARDS M J, HURRICANE O A, et al. Indirect drive ignition at the National Ignition Facility [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2017, 59(1): 014021.
- [18] 高莎莎, 吴小军, 何智兵, 等. 激光惯性约束聚变靶制备技术研究进展 [J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(3): 032001.
GAO Shasha, WU Xiaojun, HE Zhibing, et al. Research progress of fabrication techniques for laser inertial confinement fusion target [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(3): 032001.
- [19] HAMMEL B A, WEBER C R, STADERMANN M, et al. A “polar contact” tent for reduced perturbation and improved performance of NIF ignition capsules [J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25(8): 082714.
- [20] MARTINEZ D A, SMALYUK V A, MACPHEE A G, et al. Hydro-instability growth of perturbation seeds from alternate capsule-support strategies in indirect-drive implosions on National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(10): 102707.
- [21] SMALYUK V A, ROBEY H F, ALDAY C L, et al. Review of hydro-instability experiments with alternate capsule supports in indirect-drive implosions on the National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2018, 25(7): 072705.
- [22] WEBER C R, CASEY D T, CLARK D S, et al. Improving ICF implosion performance with alternative capsule supports [J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(5): 056302.
- [23] MACPHEE A G, CASEY D T, CLARK D S, et al. X-ray shadow imprint of hydrodynamic instabilities on the surface of inertial confinement fusion capsules by the fuel fill tube [J]. *Physical Review: E*, 2017, 95(3): 031204.
- [24] 谷建法, 葛峰峻, 戴振生, 等. 靶丸支撑膜对 ICF 内爆性能影响的模拟研究 [J]. *计算物理*, 2020, 37(6): 631-638.
GU Jianfa, GE Fengjun, DAI Zhensheng, et al. Influence of capsule support tent on ICF capsule implosion performance: simulation study [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2020, 37(6): 631-638.
- [25] HAAN S W, LINDL J D, CALLAHAN D A, et al. Point design targets, specifications, and requirements for the 2010 ignition campaign on the National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18(5): 051001.
- [26] AZIZ A. The critical thickness of insulation [J]. *Heat Transfer Engineering*, 1997, 18(2): 61-91.

(编辑 武红江)