

氦气填充对冷冻靶温度特性影响的数值研究

周旭, 胡宇鹏*, 李明海, 徐建国, 王易君, 毛勇建

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 惯性约束聚变冷冻靶制备中, 为实现靶丸点火, 需将柱腔内低压氦气填充至高压。为解决氦气填充过程中的热物理问题, 本文基于 CFD 数值方法, 研究了冷冻靶内流场与靶丸表面温度场随氦气填充速度、温度以及稳态压力的变化规律。结果表明, 在填充过程, 高温氦气烘烤靶丸南半球, 导致其温度明显高于北半球, 且改变氦气填充速度对靶丸表面温度的影响远小于对填充温度的。稳态阶段氦气填充压力为 10 kPa 时, 靶丸南北极温度接近, 但随着氦气填充压力的升高, 自然对流效应加强, 导致北极与南极温差不断升高, 通过参数分析得到临界填充压力为 100 kPa。

关键词: 冷冻靶; 氦气填充; 稳态压力; 温度特性

中图分类号: TL331

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)03-0754-08

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0350

Numerical Study of Effect of Helium Filling on Temperature Characteristic of Cryogenic Target

ZHOU Xu, HU Yupeng*, LI Minghai, XU Jianguo, WANG Yijun, MAO Yongjian

(Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: In the design of the inertial confinement fusion cryogenic target, the helium gas with low pressure in the cryogenic target is filled to the high pressure in order to achieve ignition. Due to convective heat transfers, the fillings of helium cause thermal environment around the capsule, which may generate the melting of the DT ice layer. The CFD numerical methods coupled with multiple heat transfer mechanisms under three-dimensional finite volume frame were employed to investigate the thermophysical phenomena in the helium filling process in this paper. The effects of the filling velocity, temperature and steady pressure on the flow and temperature characteristics in the cryogenic target were studied. The distributions of temperature in the capsule surface were analyzed. The numerical results show that the filling process can be divided into two stages: rapid filling and steady state, according to the variation of maximum temperature in the capsule surface. In the steady state, two modes of cyclic flow are found in the cryogenic target, and the temperature in the southern capsule is significantly higher than that in the north because of the helium with high temperature baking. The highest temperature is found at 62.4° south of the equator on the windward side, and the lowest temperature is on the opposite side of the highest temperature. The locations of temperature extremum point are not affected by filling velocities and temperatures. What's more, the temperatures in the capsule surface

increase (relative to 19.7 K) by 69.2, 99.8 and 134.6 mK, when the filling temperatures are 200, 250 and 300 K, respectively. However, the filling velocity of helium has little effect on the flow and temperature fields in the cryogenic target. After helium fillings were completed, the influences of the steady pressure in the cryogenic target on the temperature characteristics of the capsule surface were also evaluated. When the steady pressure is 10 kPa, the temperatures of the capsule surface are symmetrically distributed about the equator. With the increase of steady pressure, the natural convection effects are enhanced, resulting in the widening temperature differences between the north pole and the south pole. The critical pressure of 100 kPa is obtained by parameter analyses, and the corresponding Rayleigh number is about 1.12. The conclusions in this paper have certain guiding significance for the further design and experiment of cryogenic target.

Key words: cryogenic target; helium filling; steady pressure; temperature characteristic

为满足日益增长的能源需求,同时减少环境污染,通过激光驱动惯性约束核聚变(ICF)获取热核燃料聚变能的方法越来越受到重视^[1-4]。2022年12月5日,美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室(LLNL)通过国家点火装置(NIF)首次实现了核聚变反应的净能量收益,是惯性约束核聚变实现“点火”的里程碑事件,2023年LLNL再次实现惯性约束核聚变的净能量收益,极大地增强了人们发展ICF的信心^[5]。

为在ICF中实现聚变点火,需要抑制内爆过程中瑞利-泰勒不稳定性,这对冷冻靶氘氚(DT)燃料冰层质量提出极高的要求,即冰层内表面和靶丸的同心度大于99%,冰层内表面均方粗糙度小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ ^[6-7]。研究表明,热核燃料液化、结晶和晶体生长过程主要取决于冷冻靶内温度特性,靶丸表面温度分布不均匀性小于0.1 mK,可以保证冰层质量^[8-9]。而冷冻靶内温度场受到几何结构、氦气填充压力、接触热阻、降温策略、辅助加热功率、辐射条件和装配工艺误差等多方面的影响,给冷冻靶点火实验带来了极大挑战^[10-17]。

在激光驱动前,需要在柱腔内填充一定压力的氦气以满足打靶物理要求。在填充过程,不仅强制对流带来了较大的热量,而且大温差会强化柱腔内自然对流传热效应,可能导致制备完成的DT冰层融化。目前氦气填充工艺方面的研究更多关注充气时间^[18-20],如Bhandarkar等^[18]基于美国NIF研究发现适用于毛细管层流流动的Hagen-Poiseuille公式计算得到的压力变化曲线与实验结果吻合较好,但缺乏对氦气填充过程冷冻靶温度特性的认识,而温度场影响靶丸质量和实验成败。

在DT冷冻靶制备过程中,填充的氦气一方面作为冷却气体降低冰层 β 衰变热带来的温升,另一方面减少内爆时等离子体的扩散^[21]。在靶丸和柱腔之间温差的驱动下,冷冻靶内会形成氦气自然对流,二维计算结果表明腔内压力较大时,自然对流传热效应不可忽略^[22]。陈鹏玮等^[23]采用计算流体力学(CFD)方法研究了填充压力对冷冻靶温度场的影响,结果表明填充压力大于30 kPa时,冷冻靶丸表面温度均匀性无法满足要求。对NIF和LMJ(法国兆焦耳激光装置)上自然对流效应也进行了相关研究^[24-25],然而以上结果更多基于二维数值计算,无法实现冷冻靶表面温度均匀性的高精度要求。

综上所述,本文基于冷冻靶制备工艺,围绕氦气填充过程以及稳态阶段的热物理问题,采用计算流体力学方法,建立多传热机制耦合的精细化三维热分析有限体积模型,探究不同工艺背景下冷冻靶内的流动与传热特性,为冷冻靶的结构设计及试验工艺参数的精确控制提供理论指导和依据。

1 物理模型和数值方法

1.1 物理模型

本研究选取美国NIF的冷冻靶构型^[26-27]为参考,其三维几何结构如图1所示。DT燃料充气管决定靶丸表面冷点,但影响范围较小,因此在物理建模时将其简化。圆柱体柱腔内部氦气的初始压力为10 kPa,球型靶丸位于柱腔中心,由厚度为 $70\text{ }\mu\text{m}$ 的辉光放电等离子体碳氢(GDP)组成,其密度、比定压热容和导热系数分别为 $1\text{ }100\text{ kg/m}^3$ 、

54.75 J/(kg·K) 和 0.056 W/(m·K)。在靶丸内表面均匀覆盖厚度为 30 μm 的 DT 冰层, 其密度、比定压热容和导热系数分别为 253.3 kg/m³、4 135 J/(kg·K)

和 0.29 W/(m·K), DT 冰层单位体积 β 衰变热为 5.0×10⁴ W/m³。为了更加清晰地辨别冷冻靶结构, 引入赤道和南北极等地理名词, 如图 1b 所示。

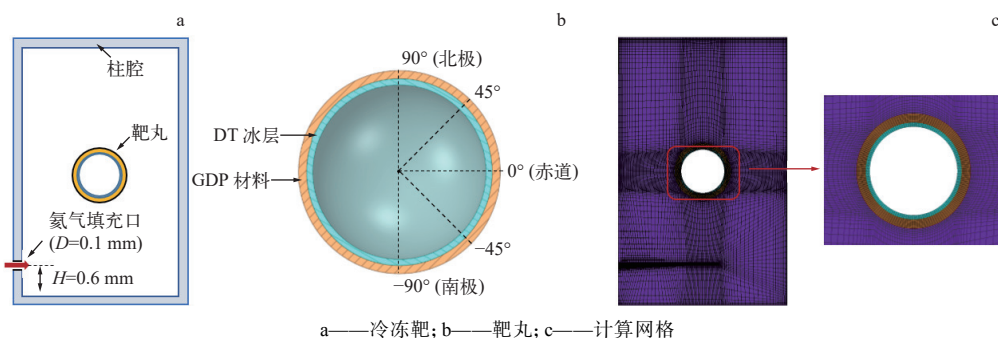


图 1 冷冻靶几何结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cryogenic target

氦气填充口直径为 0.1 mm, 位于柱腔侧壁, 距柱腔底端 0.6 mm, 入口气体速度和温度是变化的。实验中通过减压阀控制氦气填充流量, 保证填充速度在 0.001~0.1 m/s 范围内; 氦气气源温度为 300 K, 但在填充过程中受到外界低温环境的影响, 实际充入温度可能低于 300 K。因此本文计算选取填充速度(U)为 0.001、0.01、0.1 m/s, 填充温度(T)为 200、250、300 K。

1.2 控制方程

本文重点关注填充过程以及稳态阶段对流传热效应对靶丸温度均匀性的影响, 忽略气体压缩引起的温度变化, 且克努森数 $Kn < 0.001$, 因此控制方程包括:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i h}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

其中: t 为时间; x_i ($i=1, 2, 3$) 为空间坐标分量; u_i ($i=1, 2, 3$) 为速度分量; ρ 为密度; p 为压力; h 为比焓; λ 为导热系数; τ_{ij} 为分子黏性应力。

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}\mu S_{kk}\delta_{ij} \quad (4)$$

其中: S_{ij} 、 S_{kk} 为应变率张量, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$; μ 为动力黏度; δ_{ij} 为克罗内克算子。同时为考虑自然对流效应的影响, 在动量守恒方程中引入浮力项 ρg , 重力加速度 g 取 9.8 m/s²。

靶丸和 DT 冰层等固体域内能量传递过程, 可以通过以下方程求解:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

其中, T 、 c_p 和 λ 分别为固体材料的温度、比定压热容和导热系数。在计算过程中, 假设 DT 冰层厚度保持不变, 即忽略 DT 冰层的熔化或凝固等迁移过程。

在氦气填充过程中, 柱腔内流动处于较低雷诺数状态, 因此本文不考虑湍流效应。但气体温度变化范围大, 常物性计算或 Bousenesq 假设可能带来较大误差。通过查询美国国家标准与技术研究院(NIST)物性数据库, 获取 19~300 K 温度范围内氦气的密度、比定压热容、导热系数和动力黏度等物性参数, 相关结果示于图 2。

参照文献[11-12, 22-23]中冷冻靶内流动与传热计算的网格要求(10 μm 量级), 划分非均匀结构化六面体网格, 对柱腔和靶丸等近壁面区域以及大速度和温度梯度区域进行局部加密处理, 最小网格尺寸为 3.5 μm, 网格总数约为 75.6 万, 如图 1c 所示。基于有限体积方法开展数值计算, 选择基于压力的求解器求解控制方程, 采用 PISO (压力的隐式算子分裂法) 算法进行时间推进, 时间步长取 1 ms 以保证计算稳定性。为了保证计算结果精度, 采用双精度数据模式和二阶格式离散控制方程中各项。

1.3 边界条件

柱腔壁面采用定温边界条件, 以保证无氦气

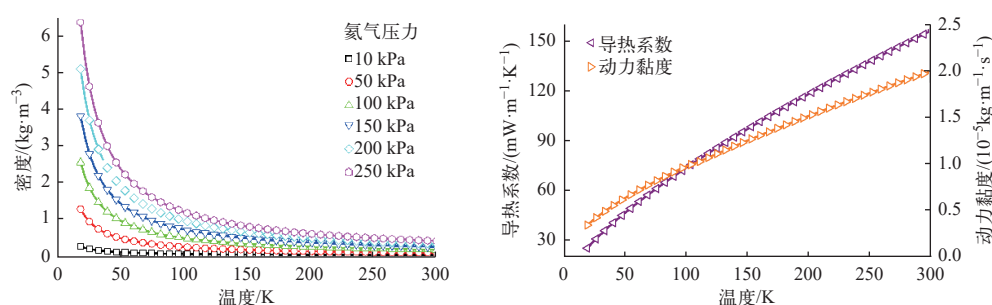


图2 氦气物性参数随温度的变化

Fig. 2 Variation of physical parameters of helium with temperature

填充时冰层内表面温度处于三相点 19.7 K; 冰层内表面给定绝热边界。在填充过程, 氦气填充口采用固定速度和温度边界, 速度 U 分别为 0.001、0.01、0.1 m/s, 温度 T 分别为 200、250、300 K; 在稳态阶段, 氦气填充口采用定温壁面边界条件。DT 冰层区域设置与 β 衰变热等效的体积内热源, 功率为 $5.0 \times 10^4 \text{ W/m}^3$ 。流体域和固体域的交界面采用直接耦合的方法, 不考虑靶丸和冰层之间的接触热阻。

2 结果分析与讨论

2.1 填充阶段

图 3 为不同氦气填充速度 U 和温度 T 时冷冻靶丸表面最高温度随时间的演化规律。根据靶丸表面最高温度变化趋势可以将氦气填充分为快速

填充和稳态两个过程。在快速填充过程(约 1.7 s 内), 靶丸表面受到高温氦气的热冲击, 温度急剧升高。随后, 柱腔-氦气-靶丸热交换基本实现平衡, 靶丸表面温度达到稳定。此外, 氦气填充速度对靶丸表面最高温度的影响远小于填充温度。在稳态过程, 氦气填充温度为 200、250、300 K 时, 对应靶丸表面最高温度分别为 19.769 2、19.799 8、19.834 6 K。因此, 在实际工艺中, 氦气填充前靶丸表面需要有较大的过冷度以防止 DT 冰层融化。

图 4 为稳态过程填充速度 0.001 m/s、温度 300 K 时, 冷冻靶内的三维流场和靶丸表面温度场, 依据氦气流动速度值对流线着色(下同)。

从图 4 可以看出, 填充的高温氦气在强迫对流和自然对流双重作用(一方面在靶丸和柱腔之间循环流动, 另一方面在沿柱腔壁面循环流动)下, 导致高温氦气不断烘烤靶丸南半球, 造成其温

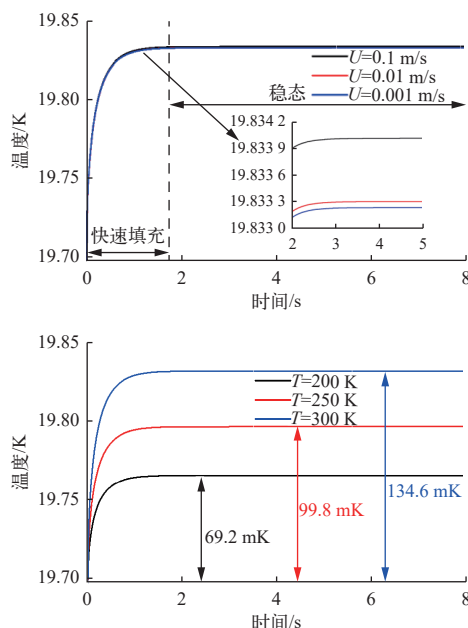


图3 填充速度和温度对冷冻靶丸表面最高温度的影响

Fig. 3 Effect of filling velocities and temperatures on maximum temperature in capsule surface

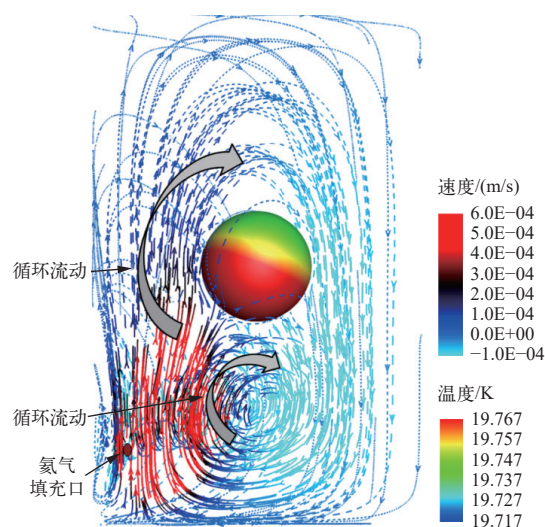


图4 填充速度 0.001 m/s、温度 300 K 时冷冻靶内三维流场和靶丸表面温度场

Fig. 4 Distributions of flow in cryogenic target and temperature in capsule surface at filling velocity of 0.001 m/s and temperature of 300 K

度明显高于北半球。

图5示出了不同填充速度和温度时冷冻靶内的流线分布和靶丸表面温度场。图5表明,不同

填充条件下冷冻靶内流场和靶丸表面温度场分布形式相似,但增加填充速度会强化冷冻靶内的流速,升高填充温度会提升靶丸表面温度。

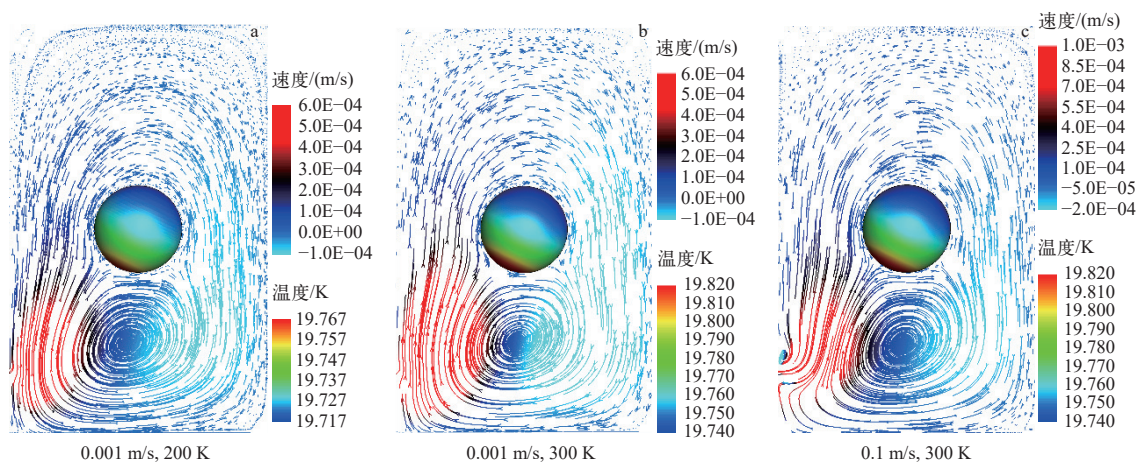


图5 填充速度和温度对冷冻靶内流线分布和靶丸表面温度场的影响

Fig. 5 Effect of filling velocities and temperatures on flow in cryogenic target and temperature in capsule surface

图6示出了氦气填充速度和温度对冷冻靶丸表面温度分布的影响,根据氦气填充口位置将靶丸分为迎风侧和背风侧。从图6可以看出,在迎风侧,温度沿靶丸南极(-90°)至北极(90°)先升高后降低,温度最高点位于 -62.4° 处,为19.834 K;在背风侧,温度沿靶丸南极至北极先降低后升高,温度最低点位于温度最高点对立面,即赤道(0°)偏北 62.4° 处,为19.717 K。从图6还可以看出:氦气填充速度的变化对靶丸表面温度分布基本无影响;增加填充温度会整体提升靶丸表面温度,但不会改变温度最高点和最低点的位置。

2.2 稳态阶段

氦气填充完成后,柱腔内流动达到稳态,冷冻

靶内包含热传导和自然对流传热两种机制。本文重点分析填充压力对氦气自然对流传热效应的影响,进而评估靶丸表面温度特性。

图7为不同压力时冷冻靶内流线分布和靶丸表面温度场,依据速度大小对流线着色。从图7可以看出,稳态时冷冻靶内流场与填充时截然不同,靠近靶丸的氦气在浮力作用下向上流动,而柱腔壁面附近的氦气被冷却向下流动,两者相互作用,在冷冻靶内形成4个回流区。由于靶丸赤道与柱腔之间的传热路径短,所以赤道处温度最低。此外,填充压力为10 kPa时,靶丸南北两极温度接近(图7a);但随着压力升高,南极温度逐渐降低,北极温度不断升高(图7c)。

为了更加清晰地说明填充压力对靶丸表面温度场的影响,绘制了填充压力为10、50、100、150、200、250 kPa时靶丸表面的温度分布,如图8所示。从图8可以看出,靶丸赤道(0°)处温度基本不受氦气填充压力的影响。当填充压力小于100 kPa时,自然对流传热效应微弱,靶丸南极(-90°)和北极(90°)温度基本关于赤道对称分布。随着压力进一步增加,自然对流传热效应增强,南极温度逐渐降低,北极温度不断升高,两者温差不断增大。当填充压力为250 kPa时,南北两极温差约为0.07 mK。

图9为不同填充压力时靶丸表面最高温度、

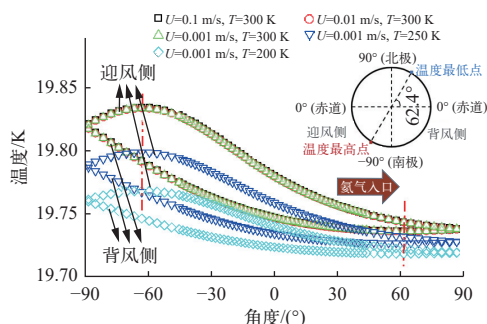


图6 氦气填充速度和温度对冷冻靶丸表面温度分布的影响

Fig. 6 Effect of filling velocities and temperatures on temperature in capsule surface

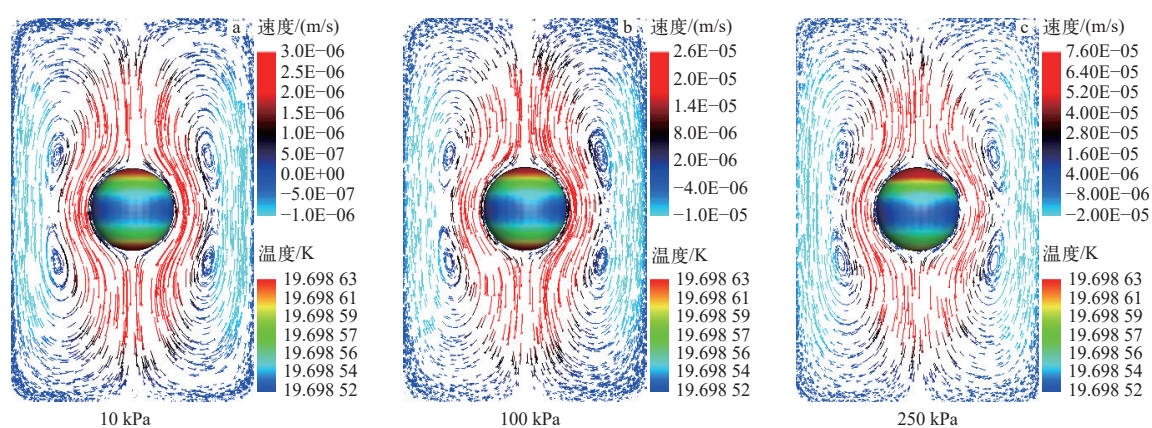


图7 填充压力对冷冻靶内流线分布和靶丸表面温度场的影响

Fig. 7 Effect of filling pressures on flow in cryogenic target and temperature in capsule surface

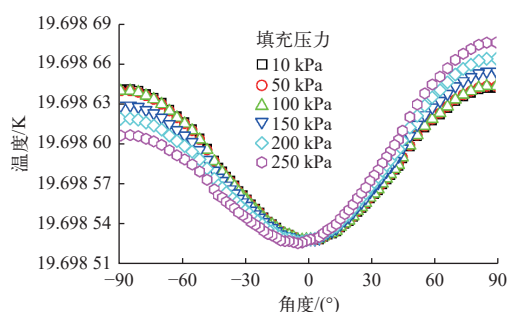


图8 填充压力对冷冻靶丸表面温度分布的影响

Fig. 8 Effect of filling pressures on temperature in capsule surface

最低温度、温差和最大速度的变化规律, 其中最高温度位于靶丸北极处, 最低温度位于靶丸赤道处。结合图7、8可以判断, 100 kPa为衡量冷冻靶内自然对流传热效应的临界压力。当填充压力从10 kPa增加到100 kPa时, 冷冻靶内自然对流传

热效应微弱, 靶丸表面温差从0.118 mK增加到0.124 mK; 当填充压力达到250 kPa时, 自然对流传热效应显著, 靶丸表面温度均匀性严重恶化, 温差达到0.154 mK。为明确自然对流效应对靶丸表面温度均匀性的影响, 引入无量纲参数瑞利数(Ra), 其表达式为:

$$Ra = \frac{\rho^2 c_p g \beta \Delta T l^3}{\mu \lambda} \quad (6)$$

其中: β 为热膨胀系数, 近似取 $0.050\ 76\ \text{K}^{-1}$; ΔT 为氦气和靶丸壁面的温差, 约为0.01 K; l 为特征长度, 取靶丸外径。填充压力变化对氦气比定压热容、导热系数和动力黏度等几乎无影响, 主要影响氦气密度, 进而改变瑞利数。当填充压力为100 kPa时, 对应瑞利数约为1.12。从图9还可以看出, 冷冻靶内最大速度和填充压力呈线性关系。

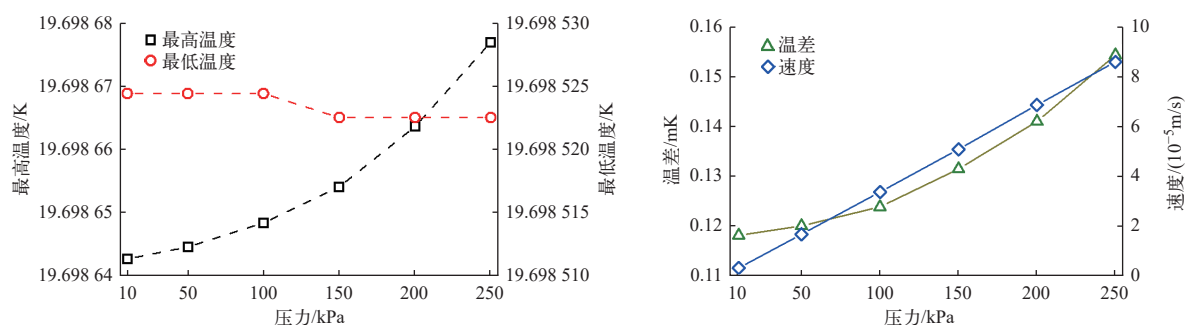


图9 填充压力对靶丸表面温度、温差和柱腔内最大速度的影响

Fig. 9 Effect of filling pressures on temperature and temperature difference in capsule surface and maximum velocity in cryogenic target

3 结论

针对冷冻靶制备工艺中氦气填充过程的热物

理问题, 基于有限体积方法建立了多传热机制耦合的三维热分析模型, 研究了氦气填充速度、温

度以及稳态压力对冷冻靶内流动与传热特性的影响,为实验开展提供了数据支撑,得到以下结论。

1) 根据填充过程靶丸表面最高温度变化规律,可以划分为快速填充和稳态两个阶段。在稳态阶段,填充速度对靶丸表面温度几乎无影响,但升高填充温度会整体提升靶丸表面温度,氦气填充温度为 200、250、300 K 时,靶丸表面最大温升(相对于 19.7 K)分别为 69.2、99.8、134.6 mK。

2) 在氦气填充稳态阶段,冷冻靶内存在两种循环流动,导致靶丸南半球温度明显高于北半球,温度最高点位于迎风侧赤道偏南 62.4°处,温度最低点位于最高点的正对面,且改变填充速度和温度不会影响温度极值点位置。

3) 冷冻靶内自然对流传热效应随着稳态压力的增加而增加,导致靶丸南北极温度由对称分布转变为南极温度低、北极温度高,临界稳态压力为 100 kPa,对应瑞利数约为 1.12。

参考文献:

- [1] TANG J, XIE Z, DU A, et al. Design and fabrication of a CH/RF/CH tri-layer perturbation target for hydrodynamic instability experiments in ICF[J]. *Journal of Fusion Energy*, 2016, 35(2): 357-364.
- [2] ROBEY H F, MOODY J D, CELLIERS P M, et al. Measurement of high-pressure shock waves in cryogenic deuterium-tritium ice layered capsule implosions on NIF[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(6): 065003.
- [3] LAN K, HE X T, LIU J, et al. Octahedral spherical hohlraum and its laser arrangement for inertial fusion[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(5): 210704.
- [4] 张棋, 马积瑞, 范金燕, 等. 对美国国家点火装置 2010 年以来实验设计思路的分析[J]. *物理学报*, 2022, 71(13): 287-298.
ZHANG Qi, MA Jirui, FAN Jinyan, et al. Analysis of design principles of the experiments on the National Ignition Facility since 2010[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(13): 287-298(in Chinese).
- [5] TOLLEFSON J, GIBNEY E. Nuclear-fusion lab achieves 'ignition': What does it mean?[J]. *Nature*, 2022, 612: 597-598.
- [6] YANG H, TAO C, GAO S, et al. Predicting spherical symmetry degeneration of non-infrared deuterium ice layer in a cryogenic capsule[J]. *Nuclear Fusion*, 2020, 60(2): 026010.
- [7] HAMZA A V, NIKROO A, ALGER E, et al. Target development for the national ignition campaign[J]. *Fusion Science and Technology*, 2016, 69(1): 395-406.
- [8] 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.
- [9] 张伟光, 张凯奋, 夏立东, 等. 氘氚冰籽晶的形核行为[J]. *物理学报*, 2022, 71(2): 211-216.
ZHANG Weiguang, ZHANG Kaifen, XIA Lidong, et al. Crystal nucleation behavior of deuterium tritium ice[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(2): 211-216(in Chinese).
- [10] 郭富城, 李翠, 陈冠华, 等. 辐射条件下冷冻靶靶丸表面及充气管温度特性数值研究[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(11): 2201-2208.
GUO Fucheng, LI Cui, CHEN Guanhua, et al. Numerical investigation on temperature characteristic of capsule surface and filling tube of cryogenic target under radiation condition[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(11): 2201-2208(in Chinese).
- [11] 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): 319-326.
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): 319-326(in Chinese).
- [12] 陈鹏玮, 厉彦忠, 李翠, 等. 低温冷冻靶温度动态特性的数值模拟研究[J]. *物理学报*, 2017, 66(19): 27-38.
CHEN Pengwei, LI Yanzhong, LI Cui, et al. Numerical simulation of dynamic thermal characteristics of cryogenic target[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(19): 27-38(in Chinese).
- [13] 王凯, 林伟, 刘元琼, 等. 背光阴影成像表征降温速率对 ICF 冷冻冰层均化的影响[J]. *物理学报*, 2012, 61(19): 324-329.
WANG Kai, LIN Wei, LIU Yuanqiong, et al. Effect of cooling rate on layering ICF cryogenic ice characterized by backlit shadowgraphy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(19): 324-329(in Chinese).
- [14] 陶朝友, 杨洪, 代飞, 等. 基于温度冲击的冷冻靶氘氚冰层结晶生长行为研究[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(11): 2209-2216.
TAO Chaoyou, YANG Hong, DAI Fei, et al. Crystal growth technology of deuterium-deuterium in cryogenic target based on temperature shock[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(11): 2209-2216(in Chinese).
- [15] 陈洵, 李翠, 厉彦忠, 等. 冷冻靶降温过程温度场分布及

- 冰层生存时间研究[J]. *原子能科学技术*, 2020, 54(7): 1332-1339.
- CHEN Xun, LI Cui, LI Yanzhong, et al. Temperature distribution of cryogenic target and lifetime of ice layer in rapid cooling process[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2020, 54(7): 1332-1339(in Chinese).
- [16] 辛毅, 厉彦忠, 丁岚, 等. 辐射条件下球腔冷冻靶温度场分布数值研究[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(1): 102-109.
- XIN Yi, LI Yanzhong, DING Lan, et al. Numerical investigations on temperature distribution of spherical hohlraum cryogenic target under radiation condition[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(1): 102-109(in Chinese).
- [17] 陶朝友, 刘喜川, 林伟, 等. 冷冻靶的环境热辐射屏蔽技术研究[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(8): 1707-1713.
- TAO Chaoyou, LIU Xichuan, LIN Wei, et al. Environmental thermal radiation shielding technology of cryogenic target[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(8): 1707-1713(in Chinese).
- [18] BHANDARKAR S, PARHAM T, FAIR J. Modeling and experiments of compressible gas flow through microcapillary fill tubes on NIF targets[J]. *Fusion Science and Technology*, 2011, 59(1): 51-57.
- [19] 郭富城, 李翠, 陈洵, 等. 冷冻靶黑腔氦气充注过程数值模拟与分析[J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(11): 79-84, 90.
- GUO Fucheng, LI Cui, CHEN Xun, et al. Numerical simulation and analysis of helium filling process in cryogenic target hohlraum[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(11): 79-84, 90(in Chinese).
- [20] 邹雄, 漆小波, 张涛先, 等. 惯性约束聚变靶丸内杂质气体抽空流洗过程的数值模拟[J]. *物理学报*, 2021, 70(7): 265-272.
- ZOU Xiong, QI Xiaobo, ZHANG Taoxian, et al. Numerical simulation of filling and evacuating process of impurity gas in target capsule of inertial confinement fusion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(7): 265-272(in Chinese).
- [21] PU Y D, HUANG T X, LI P, et al. Preliminary results from direct-drive cryogenic target implosion experiments on SGIII prototype laser facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(1): 012703.
- [22] 杨晓虎, 徐涵, 田成林, 等. 冷冻靶制备中温度控制数值模拟[J]. *原子能科学技术*, 2008, 42(9): 842-846.
- YANG Xiaohu, XU Han, TIAN Chenglin, et al. Temperature control simulation of cryogenic target fabrication[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, 42(9): 842-846(in Chinese).
- [23] 陈鹏玮, 厉彦忠, 辛毅, 等. 冷却气体对黑腔系统温度场影响数值模拟[J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(3): 553-561.
- CHEN Pengwei, LI Yanzhong, XIN Yi, et al. Numerical simulation of cooling gas effect on temperature distribution inside cryotarget system[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(3): 553-561(in Chinese).
- [24] SANCHEZ J J, GIEDT W H. Predicting the equilibrium deuterium-tritium fuel layer thickness profile in an indirect-drive hohlraum capsule[J]. *Fusion Science and Technology*, 2004, 45(2): 253-261.
- [25] 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.
- [26] HAAN S W, AMENDT P A, DITTRICH T R, et al. Design and simulations of indirect drive ignition targets for NIF[J]. *Nuclear Fusion*, 2004, 44(12): S171-S176.
- [27] KOZIOZIEMSKI B J, MAPOLES E R, SATTER J D, et al. Deuterium-tritium fuel layer formation for the national ignition facility[J]. *Fusion Science and Technology*, 2011, 59(1): 14-25.