

低温冷冻靶温度动态特性的数值模拟研究

陈鹏玮 厉彦忠 李翠 代飞 丁岚 辛毅

Numerical simulation of dynamic thermal characteristics of cryogenic target

Chen Peng-Wei Li Yan-Zhong Li Cui Dai Fei Ding Lan Xin Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 190702 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.190702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.190702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I19>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

神光 III 主机极向驱动靶丸表面辐照均匀性

[Laser irradiation uniformity for polar direct drive on ShenGuang III facility](#)

物理学报.2017, 66(14): 145202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.145202>

室温磁制冷技术的研究进展

[Progress of room temperature magnetic refrigeration technology](#)

物理学报.2017, 66(11): 110701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.110701>

甚多束激光直接驱动靶面辐照均匀性研究

[Capsule illumination uniformity illuminated by direct laser-driven irradiation from several tens of directions](#)

物理学报.2015, 64(19): 195203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.195203>

球形黑腔辐射输运问题的蒙特卡罗模拟

[Monte Carlo simulation of the radiation transport of spherical holhraum](#)

物理学报.2015, 64(14): 145203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.145203>

应用于弱光探测的热敏超导谐振器

[Thermal-sensitive superconducting coplanar waveguide resonator used for weak light detection](#)

物理学报.2014, 63(7): 070701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.070701>

低温冷冻靶温度动态特性的数值模拟研究*

陈鹏玮¹⁾ 厉彦忠^{1)2)†} 李翠¹⁾ 代飞³⁾ 丁岚¹⁾ 辛毅¹⁾

1) (西安交通大学能源与动力工程学院, 西安 710049)

2) (航天低温推进剂技术国家重点实验室, 北京 100028)

3) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2017年5月16日收到; 2017年6月10日收到修改稿)

惯性约束聚变点火成功的关键之一在于靶丸内形成均匀的氘氚冰层, 靶丸周围的温度场对冰层质量有很大影响. 首先通过实验靶系统实验验证了数值计算模型的可靠性, 在此模型的基础上, 对低温冷冻靶装置的热物理问题特别是温度动态特性问题展开了数值模拟, 重点考察冷环温度波动时, 温度传递衰减过程的规律以及各影响因素对于温度传递衰减过程的影响. 结果显示: 冷环温度一定时, 填充气体压力降低、填充气体中氦气比例增大, 靶丸表面温度均匀性提高; 当冷环温度波动时, 温度波动的周期减小、振幅减小、填充气体压力升高、填充气体中氦气比例降低有利于控制靶丸表面温度波动; 冷环温度波动的周期适中、振幅减小、填充气体压力降低、填充气体中氦气比例提高有利于改善靶丸表面温度均匀性. 研究结果对实验中冷冻靶合理配置各参数实现温度控制具有重要参考价值.

关键词: 惯性约束聚变, 靶丸表面温度波动, 靶丸表面温度均匀性, 热仿真分析

PACS: 07.20.Mc, 52.57.-z, 52.57.Bc, 44.25.+f

DOI: 10.7498/aps.66.190702

1 引言

进入21世纪以来, 能源问题日趋严峻^[1-4], 聚变能作为一种清洁高效的能源越来越受到各国的重视^[5,6]. 惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)是产生聚变反应的一种途径^[7,8], 冷冻靶已经成为国际上实现ICF点火的首选靶型^[9-11]. 两年前美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)所取得的新进展增强了人们对ICF发展的信心^[12]. ICF点火时, 对靶丸内氘氚(DT)冰层的要求很高, 包括靶丸内固体DT冰层表面密度、形状、温度分布均匀度需要大于99%, 冰层表面粗糙度小于1 μm , 以此防止瑞利泰勒不稳定性^[13-15], 要求靶丸表面温度波动不能超过 ± 2 mK^[16]. 此外, 对于靶丸外表面的温度均匀性也提出了要求^[15],

靶丸冰层的质量与靶丸表面温度场的分布有较大关系^[15,17], 温度场的均匀性主要影响冰层低模粗糙度, 有效控制温度场使其均匀, 可以降低冰层低模粗糙度从而让冰层满足点火要求. 温度场的均匀性很难达到, 主要由于黑腔自身结构的影响以及黑腔外环境温度控制时的不稳定因素. 当外界温度有一定波动时, 温度的波动会传递到靶丸表面, 进而影响到靶丸表面的温度场分布.

国内近年来在神光装置上开展了研究^[6,18-21], 实验中的难点之一是无法消除低模粗糙度从而得到均匀度较高的冰层, 表明靶丸所处的温度场并不均匀. 因此研究黑腔冷冻靶中的传热物理过程十分必要, 而且现阶段的文献主要在于优化稳态条件下的温度场分布^[15,16,22], 非稳态研究集中于降温阶段的研究^[23-26], 但少见涉及外界温度波动的研究^[23]. 实际上制冷机冷头存在温度波动^[27,28], 这

* 国家重大专项(批准号: ****040304.1)、国家自然科学基金(批准号: 51506158)和航天低温推进剂技术国家重点实验室开放课题(批准号: SKLTSCP1614)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yzli-epe@mail.xjtu.edu.cn

种波动对于冷冻靶温度场分布的影响十分值得探究. 本文通过实验检验数值模拟方法在动态温度特性中的可靠性, 并通过数值模拟对黑腔冷冻靶装置的动态温度特性进行了研究, 首次得到了冷环境温度波动对于黑腔冷冻靶内靶丸表面温度分布的影响规律, 并分析了多种因素对热流传递过程的影响. 本文的研究工作有助于加深对黑腔冷冻靶热量动态传递过程的理解, 对于后续实验开展以及形成最终温度控制方案具有指导意义.

2 实验系统与数值模型

2.1 实验系统

实验系统将柱状的冷冻靶简化为轴对称的圆柱形结构, 将球形的靶丸简化为同轴的圆柱形结构, 该实验结构相对于冷冻靶来说进行了放大, 因此在平面靶结构内部布置温度传感器进行温度监测成为可能. 如图 1(b) 所示, 实验中的 CX-1050-SD 温度传感器 4 布置在内冷腔 2 内壁上, 实验中外冷腔 2 和 8 材料为 H62 黄铜, 外径 33 mm, 厚 4.25 mm, 高 22.8 mm, 外冷腔与冷臂接触良好, 通过冷臂进行冷却, 内冷腔 2 和 7 以及抽气管 6 和充气管 3 材料为 304 不锈钢, 内冷腔外径 21 mm, 厚 4 mm, 高 11.5 mm, 填充气体为密度 $0.34 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的氦气, 实验中温度的测量与控制是由 LakeShore 340 型低温温度控制器完成. 实验中的温度波形为三角波, 其温度函数可以表示为

$$t_c(\tau) = \begin{cases} t_0 + \frac{4A}{T} \left[\tau - \left(n - \frac{3}{4} \right) T \right], & nT \leq \tau < \left(n + \frac{1}{2} \right) T, \\ t_0 - \frac{4A}{T} \left[\tau - \left(n - \frac{1}{4} \right) T \right], & \left(n + \frac{1}{2} \right) T \leq \tau < (n+1)T, \end{cases} \quad (1)$$

其中, t_c 是冷臂的温度, t_0 是基准温度, A 是温度振幅, T 是周期, τ 是时间, n 是代表第 n 个周期的自然数.

2.2 数值模型与验证

采用 ANSYS ICEM 生成网格, 如图 1(c), ANSYS Fluent 作为求解软件, 网格进行近壁面加密处理. 非稳态情况下的连续性方程、动量方程和能量

方程分别为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{u} \mathbf{u})$$

$$= -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \mathbf{u}) + \rho g[1 - \beta(T - T_{\text{ref}})], \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + \phi, \quad (5)$$

其中 t, ρ, u, p, T 分别为时间、密度、速度、压力和温度; k, μ, β, c_p 分别表示气体导热系数、动力黏性系数、热膨胀系数和定压比热; T_{ref} 表示参考温度; ϕ 是能量源项, 在本模型中为零. 动量方程 (3) 中对气体浮升力采用 Boussinesq 假设 [29,30], 气体的热膨胀系数 β 可以在物性软件 NIST 中查得.

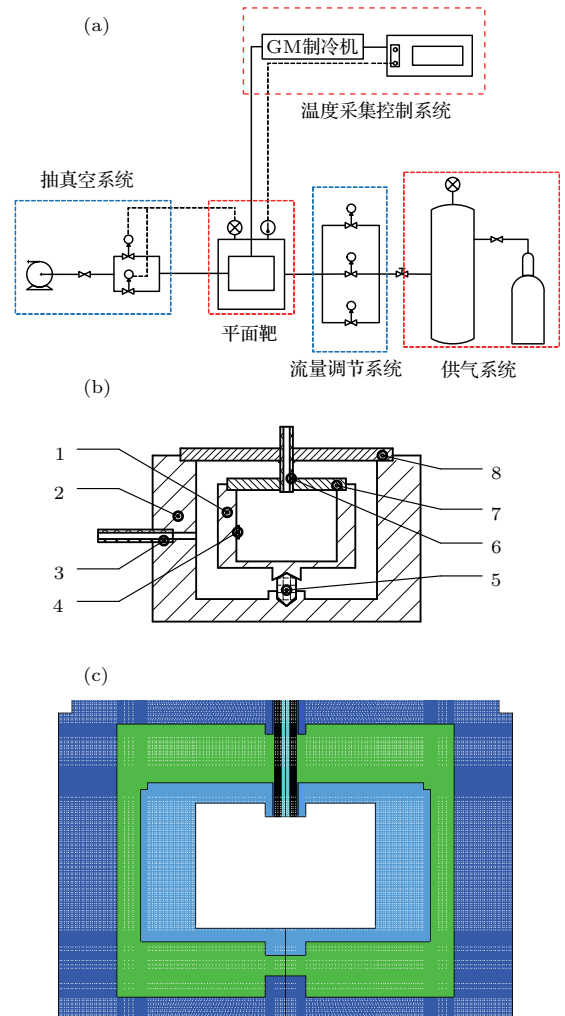


图 1 (网刊彩色) 实验装置示意图 (a) 实验装置; (b) 实验系统 1) 内冷腔, 2) 外冷腔, 3) 充气管, 4) 温度传感器, 5) 支撑杆, 6) 抽气管, 7) 内冷腔上盖板, 8) 外冷腔上盖板; (c) 计算网格

Fig. 1. (color online) Schematic of experimental apparatus: (a) Experimental apparatus; (b) experimental system; (c) computational grid.

计算中的边界条件, 冷臂温度给定如方程(1)所表示的波动温度的Dirichlet边界条件. 其他流固耦合界面给定Coupled边界条件.

冷环温度波动对靶丸外表面温度分布的影响过程存在衰减, 定义衰减比例 α 为冷臂输入振幅与传感器测得振幅的比值, 其值越大, 表示衰减的程度越大, 反之亦然. 数值模拟得到的结果与实验结果符合较好, 如图2, 误差保持在10%以内. 由此可以得到结论, 本研究中提出的数值模型可以很好地预测影响过程.

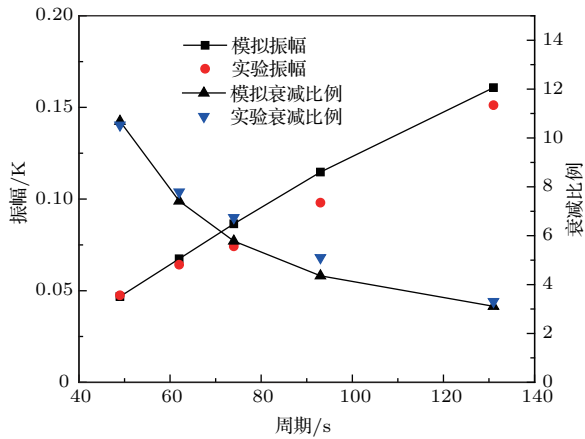


图2 (网刊彩色) 实验与数值模拟结果对比

Fig. 2. (color online) Comparison of numerical results with experimental data.

3 黑腔冷冻靶模型

3.1 物理模型

本文采用的冷冻靶制备装置及构型和靶丸尺寸以NIF^[31]为参考, 如图3所示. 外部紧贴内腔的为铝制(导热系数为随温度变化的用户自定义函数(user-defined function, UDF))热力机械结构(thermal-mechanical package, TMP), 冷环与TMP形成装配面, 提供低温, 聚变腔是材料为金(导热系数为随温度变化的函数(利用UDF实现))的圆柱腔, 外直径为5.44 mm, 长为10.01 mm, 壁厚0.1 mm, 腔内充有氦气(密度为 $0.494 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 压力为20 kPa, 研究填充气体影响时除外). 靶丸直径1.16 mm, 靶壳为CH聚合物(导热系数 $0.05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), 厚度0.2 mm; DT冰层(导热系数 $0.29 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)厚度63 μm ; 靶丸中心为DT气体(密度为 $0.367 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). 靶丸由厚度约为0.1 μm 的聚合物薄膜(导热系数 $0.05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)支撑在聚变腔的中心位置. 为了便于说明分析结果,

将赤道、南北极点和纬度等地理术语引入到冷冻靶中进行解释. 这些术语适用于靶丸中的三层表面. 下面以冷冻靶丸外表面为例进行说明. 与地球赤道的规定一样, 靶丸外表面的赤道为X轴与该表面的交点绕Y轴旋转一周所形成的圆周, 经过该圆周的面称为赤道面. 南、北极点分别为靶丸外表面上的 -90° 和 90° 所对应的点. 在靶丸外表面上与赤道面间夹角为 α 的点所构成的圆周称为纬线, 角 α 为该条纬线对应的纬度. Y轴正方向的纬度为北纬, Y轴负方向的纬度为南纬.

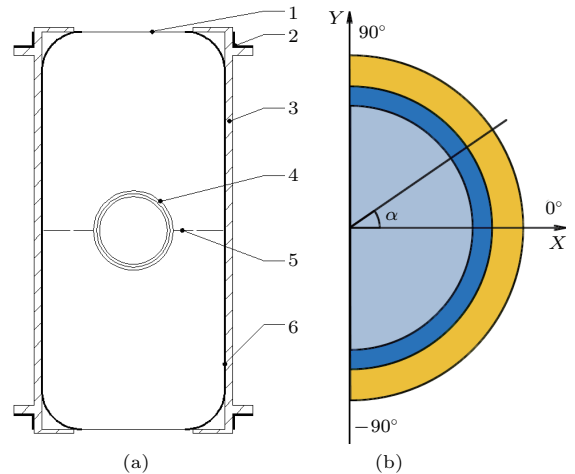


图3 (网刊彩色) 冷冻靶示意图 (a) 黑腔结构1) 激光入射口, 2) 冷环, 3) 热力机械结构, 4) 靶丸, 5) 聚合物薄膜, 6) 金腔; (b) 靶丸

Fig. 3. (color online) Schematic of cryogenic target system: (a) Schematic of the hohlraum; (b) capsule.

3.2 基本方程和边界条件

冷冻靶模型中的非稳态控制方程如(2)—(5)式所示. 数值模拟基于有限体积法(finite volume method, FVM), 网格处理中, 在靶丸及其附近的气体区域、黑腔壁面附近的网格进行了加密处理, 对生成的网格进行了网格自适应处理和网格独立性验证, 以保证计算结果准确. 为了精确求解, 采用Fluent软件的双精度模式, 辐射传热耦合采用SIMPLE算法进行, 能量使用二阶迎风格式. 计算中给定的边界条件如下:

- 1) 冷环温度给定温度随时间变化的Dirichlet边界条件;
- 2) DT冰层给定体积热为 $50000 \text{ W}/\text{m}^3$ ^[14,32-34], DT气体给定体积热为 $50 \text{ W}/\text{m}^3$, 其他部分 ϕ 为零;
- 3) 不计腔体各部分接触面的热阻.

4 计算结果与讨论

4.1 稳态温度特性

首先研究冷冻靶在稳态时的温度特性, 控制填充氦气压力从10 kPa增大到100 kPa, 选取填充氦气压力10, 50和100 kPa三种工况, 黑腔内温度场分布如图4所示. 随着填充的氦气压力增大, 靶丸表面最高温度先降后增, 靶丸表面最低温度降低, 平均温度降低, 靶丸表面温度不均匀度逐渐增大, 如图5所示. 当氦气填充气压为10 kPa时, 冷冻靶丸外表面温度不均匀度为0.542 mK, 当填充压力

增大至100 kPa时, 冷冻靶丸外表面的温度不均匀度迅速增大至0.966 mK. 氦气压力增大, 氦气的导热系数也随着增大. 氦气导热系数增大使黑腔系统换热性能增强, 但是在10—100 kPa气压范围间, 氦气导热系数变化幅值小于0.5%, 因此黑腔系统导热性能受氦气填充压力影响很小. 填充100 kPa氦气工况下冷冻靶丸最高温度与填充10 kPa的工况高0.02 mK左右, 填充100 kPa氦气工况下冷冻靶丸最低温度与填充10 kPa的工况高0.41 mK左右. 可见压力变化对于最高温的影响很小, 对于最低温的影响较大.

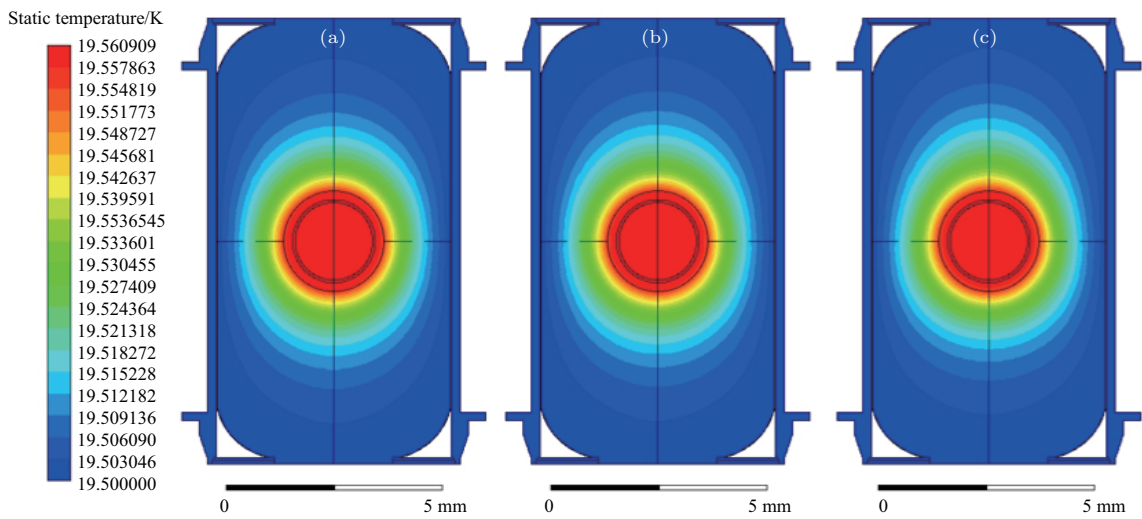


图4 (网刊彩色) 填充不同压力氦气温度分布 (a) 10 kPa; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa

Fig. 4. (color online) Temperature distribution in different helium pressure inside the hohlraum: (a) 10 kPa; (b) 50 kPa; (c) 100 kPa.

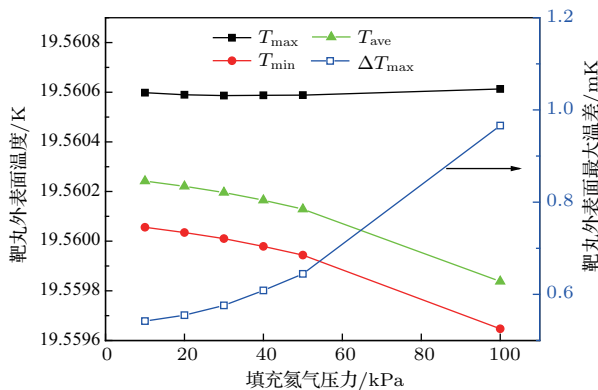


图5 (网刊彩色) 不同氦气压力下靶丸表面温度变化

Fig. 5. (color online) Temperature varies in different helium pressure on capsule surface.

以冷冻靶丸南极点温度为基准点, 将靶丸外表面上各点的温度与南极点温度相减, 建立靶丸外表面上各点与南极点温度的过剩温度分布关系.

10—100 kPa 气压下的靶丸外表面过剩温度分布如图6所示. 不论填充压力如何变化, 北极点的温度始终高于南极点, 且随着填充氦气压力升高, 北极点相对于南极点的温度也逐渐升高.

衡量自然对流强弱的无量纲参数为格拉晓夫数^[35](Grashof number, Gr), 其定义为

$$Gr = \rho^2 g \beta \Delta t l^3 / \mu^2, \quad (6)$$

其中 Δt 为流体和壁面的温差, l 为特征长度, 在此处可以选取为黑腔直径. 改变气体压力时的物性通过 NIST Refprop 8.0 查得. 可见压力升高时填充氦气密度升高, 但其导热系数、定容比热以及动力黏性系数几乎不变, 由 Gr 数的定义可知其随压力升高而升高, 因此, 压力升高时自然对流增强, 由此导致的温度不均匀性也增加.

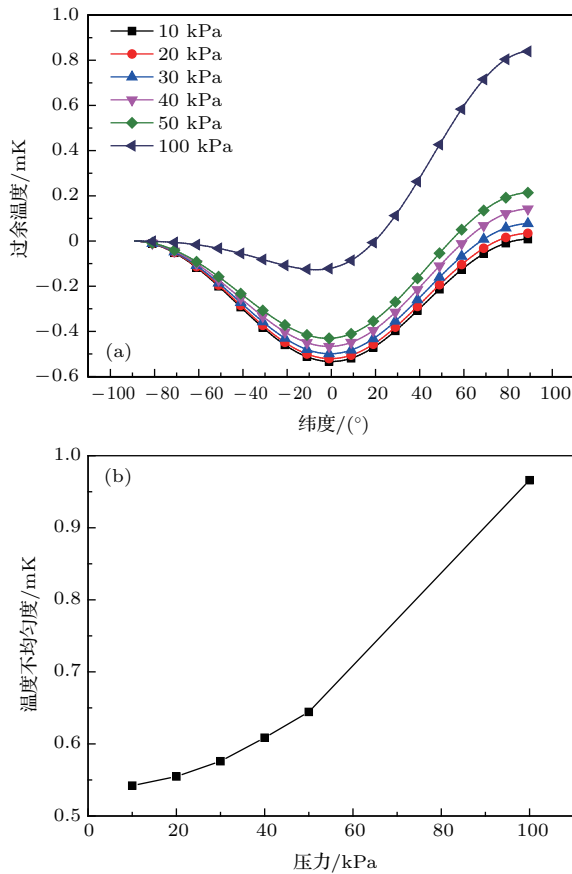


图6 (网刊彩色) 靶丸表面温度 (a) 不同压力过余温度分布; (b) 温度不均匀度随填充气体压力变化
 Fig. 6. (color online) Temperature on capsule surface: (a) Excess temperature on capsule surface in different pressure; (b) temperature ununiformity varies with helium pressure.

填充气体可以是氦气和(或)氢气, 其组分改变时, 对低温冷冻靶黑腔的热力学性能也会有一定影响. 下面研究填充氦气、填充氢气以及两者不同比

例混合物(压力 20 kPa)对于温度分布的影响. 选取填充氦气体积分数 0, 50% 和 100% 三种工况, 黑腔内温度场分布如图 7 所示. 在所选择的压力下, 氦气导热系数为 $25.677 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 氢气导热系数为 $15.653 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 氦气导热系数近似为氢气的 1.64 倍, 因此冷却气体中氦气份额的增大使黑腔系统导热性能提高, 冷冻靶丸在相同冷源温度下可以达到更低的温度, 增加冷却气体中氦气份额能够提高黑腔系统的导热性能.

表1 不同压力氦气在 19.5 K 的热物性
 Table 1. Thermal properties of helium with different pressures.

p/kPa	$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\lambda/\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$c_p/\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$\mu/\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
10	0.247	0.0257	5199	3.49×10^{-6}
20	0.494	0.0257	5205	3.49×10^{-6}
30	0.741	0.0257	5211	3.49×10^{-6}
40	0.988	0.0257	5217	3.50×10^{-6}
50	1.235	0.0257	5223	3.50×10^{-6}
100	2.471	0.0258	5253	3.52×10^{-6}

氦气体积份额从 0 增大至 100%, 随着填充的氦气体积份额增大, 靶丸表面最高温度降低, 靶丸表面最低温度降低, 靶丸表面最大温差也逐渐降低(如图 8 所示). 过余温度如图 9 所示, 显然氦气含量越高, 靶丸表面温度均匀性越好. 填充气体全部为氢气时, 靶丸表面最大温差为 0.6912 mK, 填充气体全部为氦气时, 靶丸表面最大温差降为 0.555 mK. 同样计算 Gr 数, 同压力下氢气大于氦气, 氦气体积分数增大时自然对流减弱, 由此导致的温度不均匀性将得到优化.

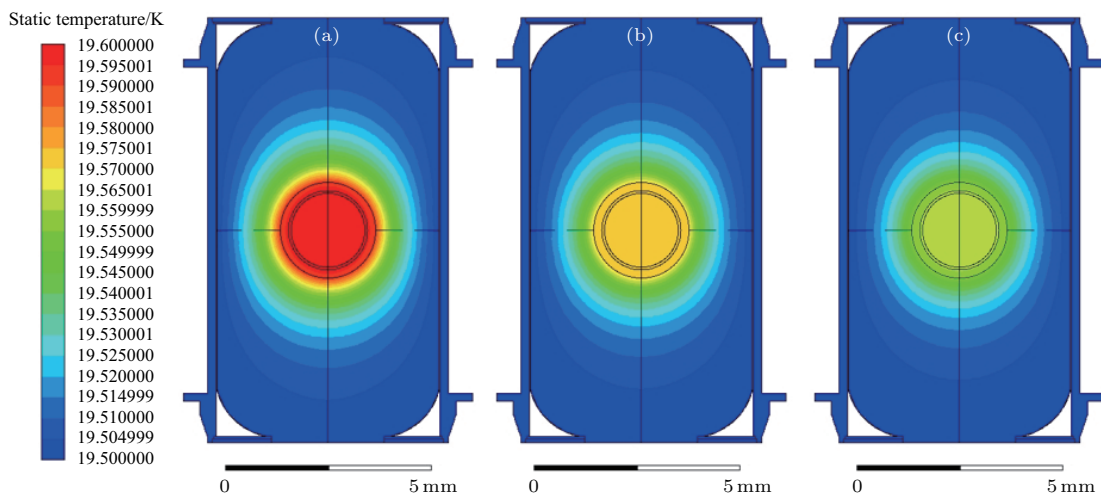


图7 (网刊彩色) 填充不同气体温度分布 (a) H₂; (b) 50%He+50%H₂; (c) He
 Fig. 7. (color online) Temperature distribution for different filling gases inside the hohlraum: (a) H₂; (b) 50%He+50%H₂; (c) He.

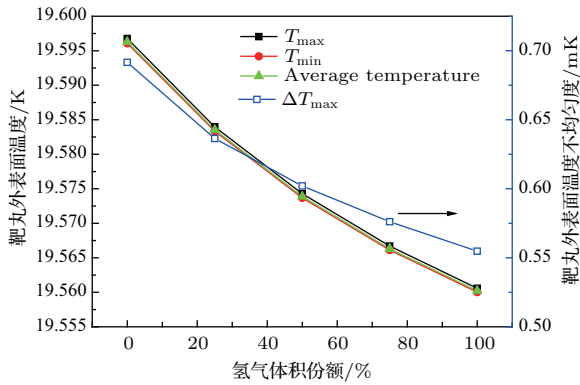


图8 (网刊彩色) 不同填充气体靶丸表面温度变化
Fig. 8. (color online) Temperature on capsule surface varies with different helium fraction.

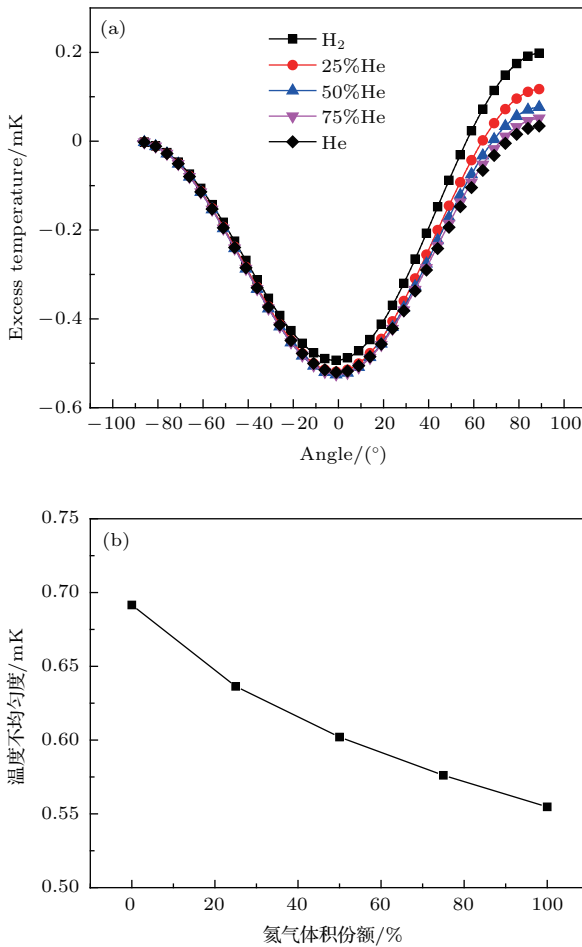


图9 (网刊彩色) 靶丸表面温度 (a) 不同氦气份额过余温度分布; (b) 温度不均匀度随氦气份额变化
Fig. 9. (color online) Temperature on capsule surface: (a) Excess temperature on capsule surface in different helium fractions; (b) temperature non-uniformity varies with helium fraction.

4.2 动态温度特性

低温冷冻靶装配完成后, 点火之前可能遇到温度扰动 (如制冷机冷头的温度波动), 此时温度扰动

对冷冻靶温度场的影响十分值得关注. 温度扰动输入的温度函数采用正弦函数, 这种扰动与工程实际中可能出现的温度波动比较符合. 正弦函数是周期性波动函数, 经过一段时间之后, 黑腔系统温度场会随时间呈现稳定的变化, 分别监测靶丸外表面平均温度和外表面最高温度、最低温度以及最大温差随时间的变化规律. 冷环上的温度波动函数形式为

$$t_c(\tau) = t_0 + A \sin\left(\frac{2\pi}{T}\tau\right), \quad (7)$$

其中各物理量含义与(1)式中相同.

以填充氦气, 压力 20 kPa (密度 $0.494 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)、冷环温度波动振幅 0.01 K、周期 2 s 为例, 其冷环处温度以及靶丸表面平均温度随时间变化, 如图 10 (a) 所示; 为方便展示, 对温度处理去掉直流成分, 仅展示温度的波动情况, 如图 10 (b) 所示.

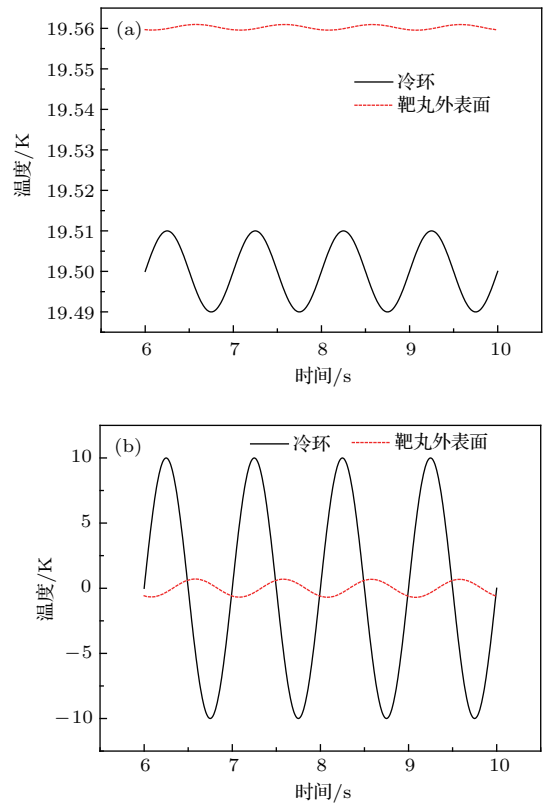


图10 (网刊彩色) 冷环和靶丸表面平均温度随时间变化 (a) 温度变化; (b) 滤波后温度变化
Fig. 10. (color online) Temperature on cooling rings and capsule surface varies with time: (a) Absolute temperature; (b) relative temperature.

4.2.1 周期(频率)的影响

当冷环上输入的温度波动周期(频率)发生变化时, 研究靶丸表面温度的变化. 选取正弦波周期分别为 0.01, 0.1, 0.5, 1, 2, 3 和 4 s, 为了便于展示,

图 11 中对时间做无量纲处理——以周期表示(均取第 8 到第 10 个周期内的数据). 靶丸表面平均温度波动的同时, 在工程中关注的靶丸表面温度不均匀度(最大温差)也随时间变化, 不同周期其变化规律也不尽相同.

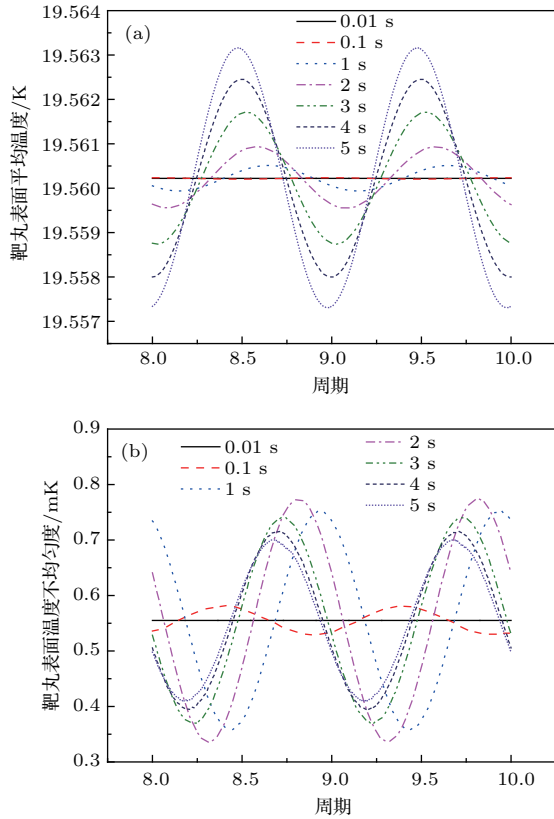


图 11 (网刊彩色) 不同周期靶丸表面温度特性 (a) 平均温度; (b) 温度不均匀度

Fig. 11. (color online) Temperature characteristic on capsule surface varies with different periods: (a) Average temperature; (b) temperature ununiformity.

靶丸表面平均温度的波动与输入波形的周期(频率)相关, 周期越大, 平均温度的振幅越大, 即衰减比例越小. 冷环上温度的周期(频率)对于衰减有影响, 周期小不利于温度扰动的影响, 周期大有利于温度扰动的影响. 周期从 4 s 减小到 1 s, 降幅 75%, 振幅从 2.92 mK 降至 0.69 mK, 降幅 76.37%, 衰减比例从 3.42 增大到 14.49, 增幅 323.68%.

由于自然对流的影响, 靶丸表面温度不均匀, 外界温度恒定时表面最大温差为 0.555 mK, 外界温度的波动会影响这种不均匀性, 并且可以发现周期增大和减小对削弱不均匀性的影响, 当周期很小时, 不均匀性几乎不再随时间变化.

由图 11 (b) 可以发现, 靶丸表面最大温差的最大值随周期的增大先增加后减小, 即随频率的增大

也是先增大后减小, 如果周期(频率)很大或很小, 表面最大温差的最大值都较小.

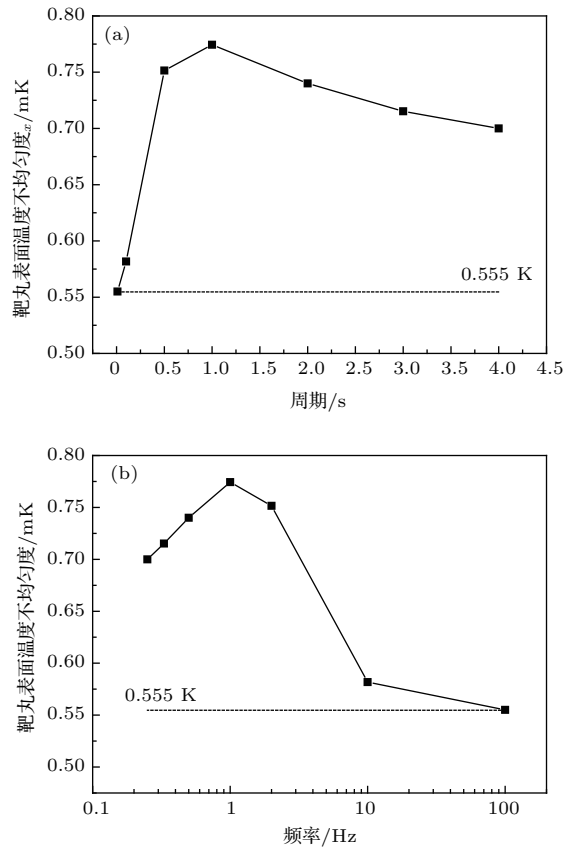


图 12 不同周期(频率)靶丸表面温度不均匀度 (a) 周期; (b) 频率

Fig. 12. Temperature ununiformity on capsule surface varies with different periods: (a) Period; (b) frequency.

周期很小(频率很大)时, 从图 12 中可以发现最大温差的最大值逐渐减小, 当周期小到一定程度, 表面最大温差的最大值接近于稳态最大温差, 这说明高频的温度扰动对于稳定靶丸表面温度场具有积极作用; 周期很大(频率很小)时, 可以预期的是, 当周期无限大, 那么相当于稳态情况, 此时的最大温差的最大值会趋向于图中的虚线, 即稳态时的最大温差. 可以发现, 对于低温冷冻靶内靶丸表面温度场, 影响最大的周期在 1 s 左右, 频率在 1 Hz 左右. 这意味着相对高频或相对低频的扰动对于表面温度场均匀性的破坏是一定的, 不会无限增大. 因此在工程中可能发生的低频和低频扰动影响是十分有限的, 对于频率很低和频率很高的扰动, 不必过于关注. 工程中应该重点关注可能发生的中频扰动, 这种扰动对于靶丸表面温度均匀性的破坏最为严重.

4.2.2 冷环振幅影响

当冷环上输入的温度波动振幅发生变化时, 研究靶丸表面平均温度和温度不均匀度变化, 选取正弦波振幅分别为10, 20, 30和40 mK, 为了便于展示, 均显示16—20 s的波形, 即第8到第10个周期(下同).

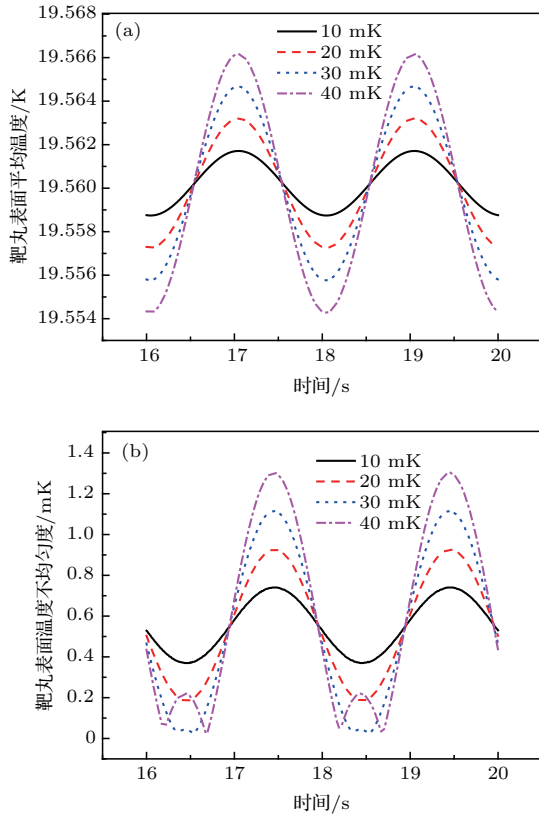


图13 (网刊彩色) 不同冷环振幅靶丸表面温度特性 (a) 平均温度; (b) 温度不均匀度

Fig. 13. (color online) Temperature characteristics on capsule surface varies with different amplitude of cooling rings: (a) Average temperature; (b) temperature non-uniformity.

靶丸表面平均温度的波动与输入波形的振幅相关, 如图13(a)所示, 振幅越大, 平均温度的振幅越大, 计算得到衰减比例几乎不变. 即冷环上温度的振幅对于衰减没有影响, 靶丸表面平均温度振幅与冷环上温度的振幅基本成正比例. 冷环温度振幅从10 mK增大到40 mK, 增幅300%, 靶丸表面温度振幅从1.48 mK增大到5.94 mK, 增幅301.35%.

如图14所示, 冷环上的温度振幅增大时, 靶丸表面温度不均匀性会升高, 并且当冷环上的温度振幅较大时, 靶丸表面的温度最高点和温度最低点会出现反转. 冷环温度振幅从10 mK增大到40 mK, 增幅300%, 靶丸表面温度不均匀度极值从0.74 mK

增大到1.30 mK, 增幅75.68%, 且可以发现温度不均匀度极值与振幅基本成线性关系.

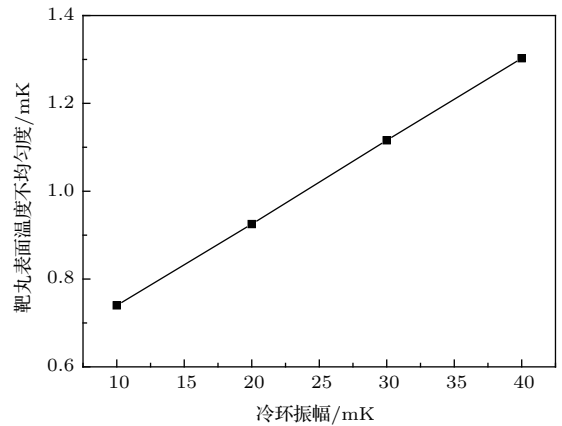


图14 不同冷环振幅靶丸表面温度不均匀度

Fig. 14. Temperature non-uniformity on capsule surface varies with different amplitude of cooling rings.

4.2.3 填充气体压力影响

NIF项目中选择填充冷却气体为低Z气体, 包括氦气、氦氢混合气体, 实验中填充冷却气体的压力各有不同, 并且填充氦氢混合气体时混合比例也各有不同[36,37]. 使用DT低温冷冻靶丸, DT燃料产生 β 衰变的衰变热需要通过热传导介质传导至黑腔外, 这个过程从冷冻靶丸开始冷冻均化一直持续到激光点火, 为了保证靶丸内形成符合点火要求的燃料冰层, 需要在低温冷冻靶黑腔内填充冷却气体作为导热介质实现热量传递. 高能点火激光通过激光入射口射入黑腔并照射在黑腔内壁转化为X射线, X射线照射导致黑腔金表面产生金等离子体的膨胀, 金的等离子体进入冕区会引起激光折射, 从而影响冷冻靶丸内爆的效果. 为了削弱金等离子体的膨胀, 可以通过增大填充冷却气体的压力(密度)来达到抑制作用, 抑制效果明显随填充气体的压力增大而加强[38].

当低温冷冻靶黑腔内填充的氦气压力发生变化时, 研究靶丸表面平均温度的变化, 选取填充氦气压力分别为10, 20, 30, 40和50 kPa, 均展示第8到第10个周期.

靶丸表面平均温度的波动与低温冷冻靶黑腔内填充气体的压力相关, 如图15(a)所示, 填充氦气的压力增大时, 靶丸表面平均温度的振幅减小, 衰减比例逐渐增大. 即低温冷冻靶黑腔内填充气体的压力对于衰减有影响, 填充气体的压力大不利于温度扰动的影响, 填充气体的压力小有利于温度扰

动的影响. 氦气压力从 10 kPa 增大到 50 kPa, 增幅 400%, 振幅从 1.53 mK 降至 1.29 mK, 降幅 15.69%, 衰减比例从 6.53 增大到 7.75, 增幅 18.68%.

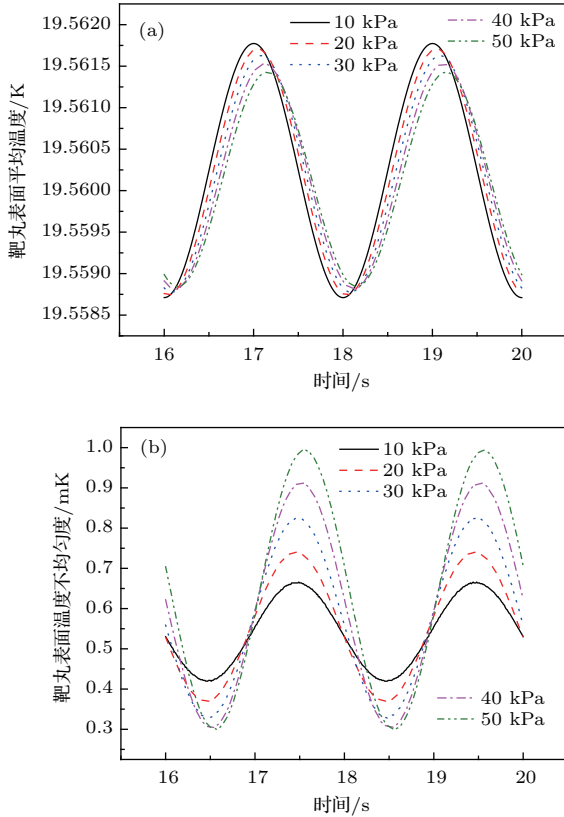


图 15 (网刊彩色) 不同填充氦气压力靶丸表面温度特性 (a) 平均温度; (b) 温度不均匀度

Fig. 15. (color online) Temperature characteristics on capsule surface varies with different helium pressure: (a) Average temperature; (b) temperature non-uniformity.

如图 15(b) 和图 16 所示, 低温冷冻靶黑腔内填充气体压力增大时, 靶丸表面温度不均匀度极值会相应增大. 氦气压力从 10 kPa 增大到 50 kPa, 增幅 400%, 靶丸表面最大温差极值从 0.67 mK 增至 0.99 mK, 增幅 49.28%. 稳态工况中, 压力从 10 kPa 增大到 50 kPa, 增幅 400%, 靶丸表面温度不均匀度极值从 0.54 mK 增至 0.64 mK, 增幅 18.88%. 相对于稳态, 压力升高对于非稳态靶丸表面温度场均匀性的破坏更大.

稳态时, 靶丸表面平均温度随填充气体压力升高而降低, 同时, 靶丸表面温度不均匀度随填充气体压力升高而升高, 如图 16 所示, 当冷环上温度有波动时, 趋势与稳态时一致, 其温度不均匀度极值同样随压力增大而增大, 只不过其值大于稳态时温度不均匀度.

经过验证, 填充氦氩混合气体或氢气时以上结论依然适用.

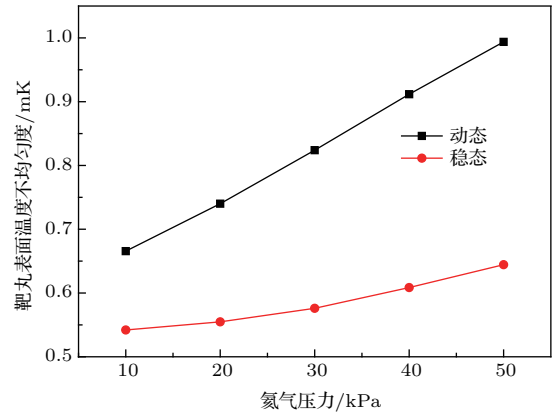


图 16 不同填充氦气压力对靶丸表面温度不均匀度影响
Fig. 16. Temperature non-uniformity on capsule surface varies with different helium pressure.

4.2.4 填充气体组分影响

当低温冷冻靶黑腔内填充的气体组分发生变化时, 研究靶丸表面平均温度的变化, 选取填充气体氦气的体积摩尔份额分别为 0%, 25%, 50%, 75% 和 100%, 展示第 8 到第 10 个周期.

靶丸表面平均温度的波动与低温冷冻靶黑腔内填充气体的组分相关, 如图 17(a) 和图 17(b) 所示, 填充气体中的氦气比例增大时, 靶丸表面平均温度的振幅减小, 衰减比例逐渐增大, 即低温冷冻靶黑腔内填充气体的组分对于衰减有影响, 填充气体中的氦气有利于温度扰动的影响, 填充气体中的氦气不利于温度分布扰动. 当氦气体积分数从 0 增大到 100% 时, 靶丸表面温度的振幅由 0.89 mK 增大到 1.48 mK, 增幅 66.29%.

如图 17(c) 和图 18 所示, 低温冷冻靶黑腔内填充气体中氦气比例增大时, 靶丸表面最大温差的极值会相应减小, 也就是说氦气相对于氢气更加有利于靶丸表面温度场的均匀性. 氦气体积分数由 0 增大到 100% 时, 靶丸表面最大温差的极值由 0.87 mK 降至 0.74 mK, 降幅 14.94%. 稳态工况中, 氦气体积分数由 0 增大到 100% 时, 靶丸表面最大温差由 0.69 mK 降至 0.55 mK, 降幅 19.79%. 相对于稳态, 非稳态中氦气体积分数增大对于靶丸表面均匀性带来的优化更小.

稳态时, 靶丸表面平均温度随填充气体中氦气含量升高而降低, 同时, 靶丸表面最大温差随填充气体中氦气含量的升高而降低. 如图 18 所示, 当冷

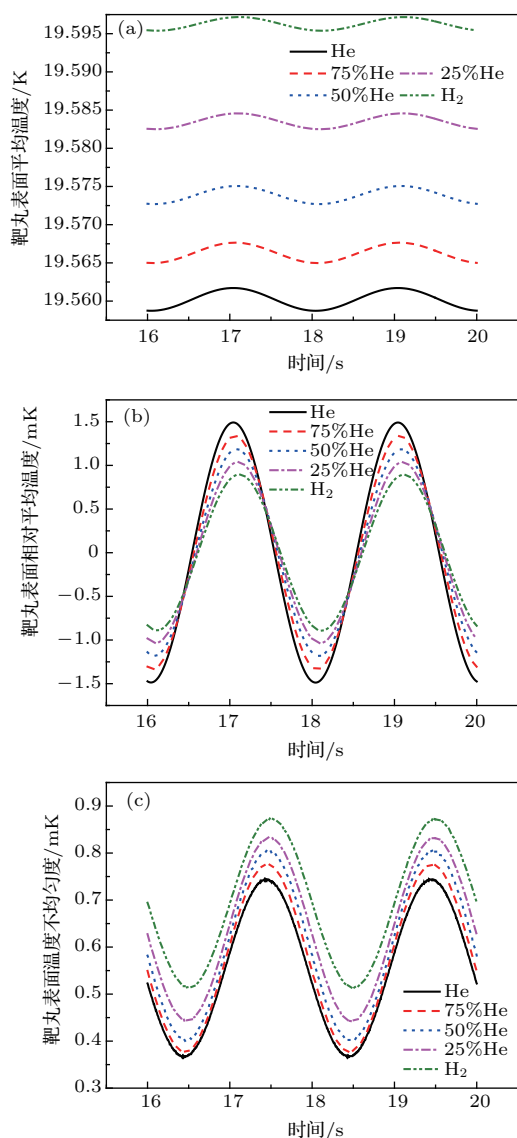


图 17 (网刊彩色) 不同填充气体组分靶丸表面温度特性 (a) 平均温度; (b) 滤波后平均温度; (c) 温度不均匀度
 Fig. 17. (color online) Temperature characteristic on capsule surface varies with different helium fraction: (a) Average temperature; (b) relative average temperature; (c) temperature non-uniformity.

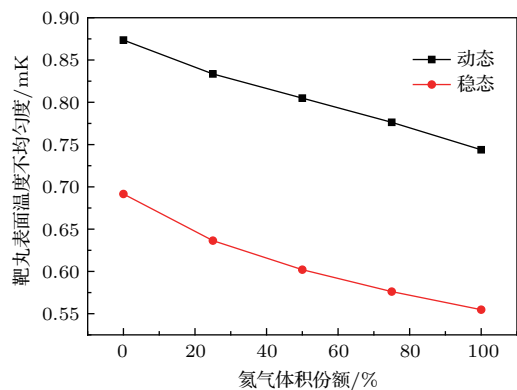


图 18 不同填充气体组分靶丸表面温度不均匀度
 Fig. 18. Temperature non-uniformity on capsule surface varies with different helium fraction.

环上温度有波动时, 趋势与稳态时一致, 其最大温差同样随填充气体中氦气含量增大而减小, 只不过其值大于稳态时最大温差值. 因此, 不论是稳态工况或者外界有扰动的工况, 填充气体中氦气含量的提高对于靶丸表面温度均匀性都是有利的.

5 结 论

通过对低温冷冻靶中温度特性的研究, 可以得到以下几点结论.

- 1) 稳态时, 随填充气体压力增大, 靶丸表面温度均匀性恶化; 填充气体中氦气比例增大, 靶丸表面温度均匀性提高.
- 2) 存在外界温度扰动时, a) 周期增大, 平均温度的振幅增大, 即衰减比例越小; 周期增大或减小都有利于改善靶丸表面温度均匀性; b) 振幅增大, 平均温度的振幅增大, 衰减比例几乎不变, 振幅增大不利于靶丸表面温度的均匀性; c) 填充气体压力增大、平均温度的振幅减小、衰减比例增大、压力增大不利于靶丸表面温度的均匀性; d) 填充气体中氦气份额提高、靶丸表面平均温度振幅增大、衰减比例减小、氦气份额提高有利于靶丸表面温度均匀性.

本文的结论有助于加深对低温冷冻靶中热物理问题的认识, 对低温冷冻靶的设计和实验开展具有指导意义, 对工程中可能出现的多种动态问题给出了规律, 工程中需要根据关注的要求合理控制各参数. 下一步通过完善不规则温度条件的动态特性, 可以进一步完善低温冷冻靶温度动态规律, 有助于低温冷冻靶研究的开展.

参考文献

- [1] Zhang X, Zhang X Z, Tan X Y, Yu Y, Wan C H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 147303 (in Chinese) [张歆, 章晓中, 谭新玉, 于奕, 万蔡华 2012 物理学报 **61** 147303]
- [2] Yang X D, Chen H, Bi E B, Han L Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 038404 (in Chinese) [杨旭东, 陈汉, 毕恩兵, 韩礼元 2015 物理学报 **64** 038404]
- [3] Horvath A, Rachlew E 2016 *Ambio* **45** 38
- [4] Chen W M, Kim H, Yamaguchi H 2014 *Energ. Policy* **74** 31
- [5] Zhang Z W, Qi X B, Li B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 145204 (in Chinese) [张占文, 漆小波, 李波 2012 物理学报 **61** 145204]
- [6] Huang X, Peng S M, Zhou X S, Yu M M, Yin J, Wen C W 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 215201 (in Chinese) [黄鑫,

- 彭述明, 周晓松, 余铭铭, 尹剑, 温成伟 2015 物理学报 **64** 215201]
- [7] Tang J, Xie Z Y, Du A, Ye J J, Zhang Z H, Shen J, Zhou B 2016 *J. Fusion Energ.* **35** 357
- [8] Holmlid L 2014 *J. Fusion Energ.* **33** 348
- [9] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
- [10] Baclet P, Bachelet F, Choux A, Fleury E, Jeannot L, Laffite S, Martin M, Moll G, Pascal G, Reneaume B, Theobald M 2006 *Fusion Sci. Technol.* **49** 565
- [11] Wang K, Xie R, Lin W, Liu Y Q, Li J, Qi X B, Tang Y J, Lei H L 2013 *High Power Laser and Particle Beams* **25** 3230 (in Chinese) [王凯, 谢端, 林伟, 刘元琼, 黎军, 漆小波, 唐永建, 雷海乐 2013 强激光与粒子束 **25** 3230]
- [12] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, Celliers P M, Cerjan C, Dewald E L, Dittrich T R, Doppner T, Hinkel D E, Berzak Hopkins L F, Kline J L, Le Pape S, Ma T, MacPhee A G, Milovich J L, Pak A, Park H S, Patel P K, Remington B A, Salmonson J D, Springer P T, Tommasini R 2014 *Nature* **506** 343
- [13] McKenty P W, Goncharov V N, Town R P J, Skupsky S, Betti R, McCrory R L 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2315
- [14] Martin M, Gauvin C, Moll G, Raphael O, Legaie O, Jeannot L 2013 *Fusion Sci. Technol.* **63** 82
- [15] Moll G, Martin M, Baclet P 2007 *Fusion Sci. Technol.* **51** 737
- [16] Moll G, Baclet P, Martin M 2006 *Fusion Sci. Technol.* **49** 574
- [17] London R A, Koziolowski B J, Marinak M M, Kerbel G D, Bittner D N 2005 *Fusion Sci. Technol.* **49** 608
- [18] Wang F, Peng X S, Shan L Q, Li M, Xue Q X, Xu T, Wei H Y 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 185202 (in Chinese) [王峰, 彭晓世, 单连强, 李牧, 薛全喜, 徐涛, 魏惠月 2014 物理学报 **63** 185202]
- [19] Bi P, Liu Y Q, Tang Y J, Yang X D, Lei H L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7531 (in Chinese) [毕鹏, 刘元琼, 唐永建, 杨向东, 雷海乐 2010 物理学报 **59** 7531]
- [20] Bi P, Lei H L, Liu Y Q, Li J, Yang X D 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 062802 (in Chinese) [毕鹏, 雷海乐, 刘元琼, 黎军, 杨向东 2012 物理学报 **61** 062802]
- [21] Yin J, Chen S H, Wen C W, Xia L D, Li H R, Huang X, Yu M M, Liang J H, Peng S M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 015202 (in Chinese) [尹剑, 陈绍华, 温成伟, 夏立东, 李海荣, 黄鑫, 余铭铭, 梁建华, 彭述明 2015 物理学报 **64** 015202]
- [22] Moll G, Martin M, Collier R 2009 *Fusion Sci. Technol.* **55** 283
- [23] Martin M, Gauvin C, Choux A, Baclet P, Pascal G 2006 *Fusion Sci. Technol.* **49** 600
- [24] Martin M, Gauvin C, Choux A, Baclet P, Pascal G 2007 *Fusion Sci. Technol.* **51** 747
- [25] Aleksandrova I V, Akunets A A, Koresheva E R, Koshelev E L, Timasheva T P 2016 *Bull. Lebedev. Phys. Inst.* **43** 352
- [26] Wang K, Lin W, Liu Y Q, Xie D, Li J, Ma K Q, Tang Y J, Lei H L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 195204 (in Chinese) [王凯, 林伟, 刘元琼, 谢端, 黎军, 马坤全, 唐永建, 雷海乐 2012 物理学报 **61** 195204]
- [27] Motojima O, Yamada H, Ashikawa N, Emoto M, Funaba H, Goto M 2003 *J. Plasma Fusion Res.* **5** 22
- [28] Hamaguchi S, Imagawa S, Obana T, Yanagi N, Moriuchi S, Sekiguchi H, Oba K, Mito T, Motojima O, Okamura T, Semba T, Tyoshinaga S, Wakisaka H 2008 *AIP Conference Proceedings Chattanooga, USA, July 16–20, 2007* 1724
- [29] Zhong Z Y, Lloyd J R, Yang K T 1985 *J. Heat Trans.* **107** 133
- [30] Zhuang P, Liu F, Turner I, Gu Y T 2014 *Appl. Math. Model.* **38** 3860
- [31] Haan S W, Atherton J, Clark D S, Hammel B A, Callahan D A, Cerjan C J, Dewald E L, Dixit S, Edwards M J, Glenzer S, Hatchett S P, Hicks D, Jones O S, Landen O L, Lindl J D, Marinak M M, MacGowan, B J, MacKinnon A J, Spears B K, Suter L J, Town R P, Weber S V, Kline J L, Wilson D C 2013 *Fusion Sci. Technol.* **63** 67
- [32] Moll G, Martin M, Collier R 2011 *Fusion Sci. Technol.* **59** 182
- [33] Martin M, Moll G, Lallet F, Choux A, Collier R, Legaie O, Jeannot L 2011 *Fusion Sci. Technol.* **59** 166
- [34] Souers P C 1986 *Hydrogen Properties for Fusion Energy* (Berkeley: University of California Press) p106
- [35] Baïri A, Zarco-Pernia E, De María J M G 2014 *Appl. Therm. Eng.* **63** 304
- [36] Berger R L, Suter L J, Divol L, London R A, Chapman T, Froula D H, Meezan N B, Neumayer P, Glenzer S H 2015 *Phys. Rev. E* **91** 031103
- [37] Kirkwood R K, Moody J D, Kline J, Dewald E, Glenzer S, Divol L, Michel P, Hinkel D, Berger R, Williams E, Milovich J, Lin Y, Rose H, MacGowan B, Landen O, Rosen M, Lindl J 2013 *Plasma Phys. Contr. Fusion* **55** 103001
- [38] Moll G, Charton S 2004 *Fusion Sci. Technol.* **45** 233

Numerical simulation of dynamic thermal characteristics of cryogenic target*

Chen Peng-Wei¹⁾ Li Yan-Zhong^{1)2)†} Li Cui¹⁾ Dai Fei³⁾ Ding Lan¹⁾ Xin Yi¹⁾

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

2) (State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Beijing 100028, China)

3) (Research Centre of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 16 May 2017; revised manuscript received 10 June 2017)

Abstract

Fusion power offers the prospect of a safe and clean sustainable energy source, and is of increasing importance for meeting the world energy demand and curbing CO₂ emissions. For an indirect-driven inertial confinement cryogenic target, the D-T ice layer inside the capsule should have a uniformity more than 99% and an inner surface roughness less than a root mean square value of 1 μm to avoid Rayleigh-Taylor instabilities. And this highly smooth ice layer required for ignition is considered to be affected by the thermal environment around the fuel capsule. In the present study, a numerical investigation is conducted to examine the static and dynamic characteristics of the thermal environment outside the fuel capsule. Numerical model is proposed and verified by a simplified cryogenic target, and the calculated temperature distribution around the capsule shows to be in good agreement with the experimental data. Based on the established model, the propagation of periodic disturbance of cooling wall temperature in the hohlraum is investigated, and the relations between the temperature disturbance on the cooling wall and the temperature distribution around the capsule surface are obtained. The effects of disturbance amplitude, the disturbance period, and the hohlraum gas composition on the propagation process are investigated separately. The results indicate that for stable cooling temperature, the thermal environment around the capsule shows certain dependence on the gas filled in the hohlraum. The temperature uniformity of the capsule outer surface deteriorates with the increase of fill gas pressure but can be improved by increasing the He content of the filling gas mixture. At an oscillating cooling temperature, the attenuation of amplitude is significant when the periodic disturbance propagates from the cooling rings to the hohlraum and to the capsule surface. For the sine wave form disturbance investigated in the present study, shorter disturbance period results in larger attenuation of the disturbance amplitude. Higher gas pressure leads to smaller amplitude of average temperature on the capsule outer surface. The propagation process of cooling temperature disturbance also demonstrates dependence on the filling gas composition. The higher fraction of H₂ in the He-H₂ mixture helps to attenuate the disturbance amplitude and suppress the propagation of the temperature disturbance. However, the temperature uniformity around the capsule exhibits different characteristics from cooling temperature disturbance. Under the oscillating cooling conditions, moderate period, lower amplitude, lower pressure and higher fraction of He in the He-H₂ mixture help to improve the temperature uniformity around the capsule. The results are of guiding significance for determining the controlling scheme in experiment and further design option for the cryogenic target.

Keywords: inertial confinement fusion, temperature fluctuates on capsule surface, temperature uniformity on capsule surface, thermal simulation

PACS: 07.20.Mc, 52.57.-z, 52.57.Bc, 44.25.+f

DOI: 10.7498/aps.66.190702

* Project supported by the National Special Program of China (Grant No. ***040304.1), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51506158), and the State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenic Propellants, Beijing, China (Grant No. SKLTSCP1614).

† Corresponding author. E-mail: yzli-epe@mail.xjtu.edu.cn