

黑腔冷冻靶传热与自然对流的数值模拟研究

黄鑫 彭述明 周晓松 余铭铭 尹剑 温成伟

Numerical simulation of heat transfer and natural convection of the indirect-driven cryogenic target

Huang Xin Peng Shu-Ming Zhou Xiao-Song Yu Ming-Ming Yin Jian Wen Cheng-Wei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 215201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.215201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.215201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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 holraum

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

氘气-塑料靶丸变收缩比内爆物理实验研究

Variations of implosion performance with compression ratio in plastic DD filled capsule implosion experiment

物理学报.2015, 64(12): 125203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.125203>

基于神光 III 原型的整形激光直接驱动准等熵压缩实验研究

Quasi-isentropic experiment based on Shen Guang-III prototype laser facility with laser direct drive illumination

物理学报.2015, 64(8): 085202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.085202>

玻璃微球内氘结晶行为研究

Crystallization behaviors of deuterium in glass microsphere

物理学报.2015, 64(1): 015202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.015202>

黑腔冷冻靶传热与自然对流的数值模拟研究*

黄鑫[†] 彭述明[‡] 周晓松 余铭铭 尹剑 温成伟

(中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

(2015年4月12日收到; 2015年7月7日收到修改稿)

惯性约束聚变的设计要求在靶丸内形成均匀光滑的氘氚冰层, 靶丸周围的热环境对冰层的质量特别是低阶粗糙度有很大的影响. 本文对自主研发的黑腔冷冻靶实验装置中的热物理问题展开了数值模拟, 重点考察了黑腔冷冻靶的传热和流体力学特性. 通过参数分析得到了自然对流对靶丸温度均匀性产生影响的临界条件. 比较了黑腔不同布置朝向时的流场和温度分布, 结果显示黑腔水平布置时自然对流更加强烈, 造成的靶丸温度不均匀性也更大. 在此基础上, 讨论了消除自然对流影响的可能性, 结果发现仅当黑腔垂直布置时利用黑腔分区方法能够消除对流效应对靶丸温度不均匀性的影响而黑腔水平布置时不能消除. 研究结论对于实验中冷冻靶结构的设计、改进和实验的开展等具有指导意义.

关键词: 惯性约束聚变, 冷冻靶, 自然对流, 热模拟

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

DOI: 10.7498/aps.64.215201

1 引言

惯性约束核聚变(ICF)是解决人类面临的能源危机的重要途径. 间接驱动的黑腔冷冻靶被认为是有希望的点火靶型, 美国国家点火装置(NIF)最新的内爆实验结果增强了人们对ICF发展前景的信心^[1]. 在ICF点火时, 为了抑制内爆过程中瑞利-泰勒流体力学不稳定性, 必须在靶丸内形成均匀分布、内表面光滑的冷冻氘氚(D-T)冰层, 要求冰层均匀度必须大于99%, 内表面均方粗糙度小于 $1\ \mu\text{m}$ ^[2]. D-T靶丸利用氘的自身 β 衰变热能够对冷冻冰层进行重新分层, 通过温差使得较厚的D-T冰层升华向较薄的区域迁移^[3]. 冰层质量取决于如下两个因素: 1) 一是冷冻降温时晶体生长过程^[4], 它对冰层内表面的缺陷、形貌、高阶粗糙度有较大影响, 已有的实验结果表明, 在降温过程中D-T从单晶开始生长有利于形成较高质量的冰层. 2) 二是靶丸所处的热环境^[5], 它对冰层内表面低阶粗糙度有较大的影响. 理想的热环境应该是使靶丸处于一个

球形分布的均匀温度场中, 即靶丸表面的温度分布应该一致. 然而由于各种因素, 并不是总能形成均匀的温度场, 温度的不均匀性有以下两个来源: 1) 一是黑腔的自身结构所致. 柱体黑腔的非球形结构导致靶丸周围温度场距离球形温度场存在一定偏差, 此外黑腔的激光入口(LEH)由于存在热辐射效应, 会使得靶丸靠近LEH的部位温度更高. 2) 二是黑腔内的自然对流换热所致. 为了防止内爆实验时等离子体扩散, 黑腔内必须充有一定的气体(氦气或氦氢混合气体), 在低温下会形成自然对流效应, 使靶丸表面非均匀换热. 对流效应的强弱与黑腔结构、填充气体等因素有关.

国内在神光装置上开展的一些内爆实验都是针对常温气体靶丸^[6], 尚不具备开展冷冻靶打靶实验的能力, 对冷冻靶的研究也才刚刚开始. 目前在平面冷冻靶^[7]、背光成像^[8]和红外均化等^[9]方面已经进行了基础性的探索. 黑腔冷冻靶的研制也已开展, 并对低温下黑腔内靶球的结晶行为进行了初步研究^[10]. 冷冻靶实验中遇到的难点之一是难以消除冰层的低阶粗糙度, 无法得到均匀度较高的

* 国家重大专项和中国博士后科学基金(批准号:2014 M552382)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xin2008hust@163.com

[‡] 通信作者. E-mail: pengshuming@caep.cn

冰层, 这表明靶丸所处的热环境并不理想. 因此结合实际实验装置, 研究黑腔冷冻靶中的热物理问题就十分重要. 美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 负责 NIF 点火靶的研制, 对黑腔冷冻靶开展了理论和数值模拟的研究^[11-13], 提出了黑腔中形成均匀温度场的热控技术, 如辅助加热和温差控制等. 得益于准确的理论预测和精确的温控技术, LLNL 能够很好的消除冰层的低阶粗糙度, 并已经得到了满足点火设计要求的冰层^[14]. 法国核能研究中心 (CAE) 也针对兆焦激光装置 (LMJ) 黑腔冷冻靶进行了研究^[15], 通过数值模拟^[16,17] 对黑腔冷冻靶的设计进行优化和改进. 本文通过三维数值模拟对已有黑腔冷冻靶装置中的传热和流体力学特性进行研究, 首次得到了黑腔内自然对流换热效应对靶丸产生影响的临界条件 (瑞利数和操作压力). 针对与 NIF 和 LMJ 黑腔冷冻靶布置朝向不同的特点, 比较了黑腔水平布置和垂直布置时传热和流体力学特性的区别, 并详细讨论了这两种情况下自然对流完全抑制的可能性. 本文的研究工作将加深对黑腔冷冻靶传热和流动规律的理解, 为黑腔冷冻靶的设计和优化提供理论依据, 对后续实验的开展具有指导意义, 并将有助于获得均匀光滑的燃料冰层.

2 黑腔冷冻靶模型

2.1 物理模型

自主研发的黑腔冷冻靶装置的核心部分为燃料室和靶室, 由两台独立的低温制冷机通过氦气回路进行冷却降温. 数值模拟中仅仅考虑装置中的热传导部分, 即包括冷冻壁、冷冻环、柱腔在内的组件以及黑腔内的靶丸和薄膜结构 (需要考虑时), 如图 1(a) 所示. 黑腔按照轴向水平进行布置, 并通过冷冻壁和冷冻环进行冷却, 靶丸通过细纤维丝或薄膜固定在黑腔中央. 如无特别说明, 黑腔内充有密度为 1.0 kg/m^3 的氦气 (当考虑不同气体工质的影响时除外). 冷冻壁、冷冻环和黑腔均为高导热无氧铜, 在 20 K 下其导热系数为 $5250 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 吸收系数为 0.2 . 冷冻臂与冷冻环之间为一体化结构, 冷冻环与黑腔之间采用低温胶连接. 黑腔为圆柱型结构, 其尺寸如图 1(b) 所示. 靶丸直径为 2 mm , 靶壳为碳氢聚合物材料, 壁厚为 $160 \mu\text{m}$, 导热系数为 $0.05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; D-T 冰层厚度为 $100 \mu\text{m}$, 导热系数为 $0.29 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; 靶丸中心 D-T 气体密度为

0.28 kg/m^3 . 黑腔两端由透光的石英玻璃用低温胶密封, 厚度为 0.1 mm , 导热系数为 $2.0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, 吸收系数为 0.6 . 黑腔位于冷冻罩内, 真空环境下导热可忽略不计, 因此仅仅考虑它们之间的辐射换热.

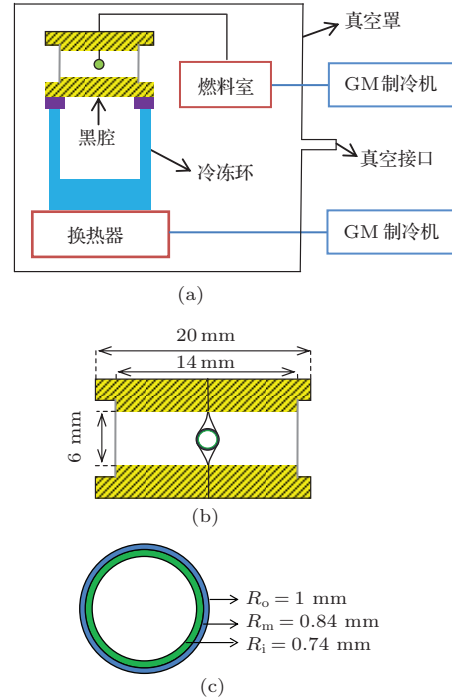


图 1 (网刊彩色) 黑腔冷冻靶示意图 (a) 冷冻靶实验装置; (b) 黑腔结构; (c) 靶丸尺寸

Fig. 1. (color online) Schematic of the indirect-drive cryogenic target system: (a) Schematic of the experimental apparatus; (b) schematic of the hohlraum; (c) dimensions of the capsule.

2.2 控制方程

稳态情况下的连续性方程、动量方程和能量方程分别为

$$\nabla(\rho\bar{u}) = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial t} + \nabla(\rho\bar{u}\bar{u}) = -\nabla p + \nabla(\mu\nabla\bar{u}) + \rho g [1 - \beta(T - T_{\text{ref}})], \tag{2}$$

$$\rho c_p \bar{u} \cdot \nabla T = k \nabla^2 T + \Phi, \tag{3}$$

其中 ρ , u , p , T 分别为密度、速度、压力和温度, k , μ , β , c_p 分别为气体导热系数、动力黏度、热膨胀系数和定压热容, T_{ref} 是参考温度, Φ 为能量源项. 由于黑腔内的气体温度变化较小, 动量方程中对于气体浮升力采用了 Boussinesq 假设. 对于理想气体, 热膨胀系数 $\beta = -1/T$. (1) 和 (2) 式仅仅在气体区

域被计算, (3) 式在整个黑腔冷冻靶中被计算. 除 D-T 冰层和气体, 其他部分 ϕ 都为零.

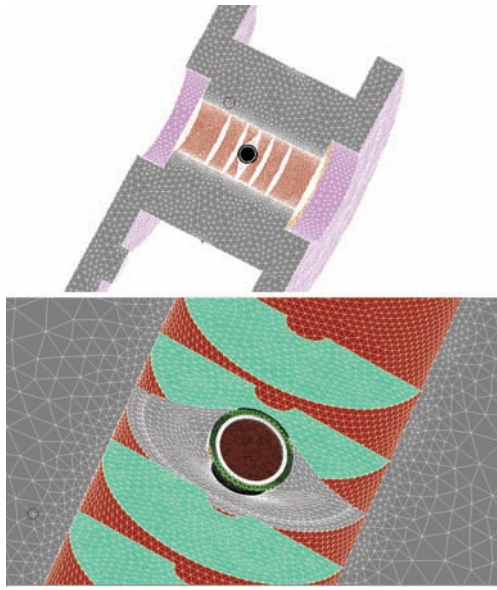


图2 (网刊彩色) 三维模型网格

Fig. 2. (color online) Basic mesh for the 3D model.

数值模拟基于有限容积法, 能量方程差分采用二阶迎风格式, 压力和速度耦合采用SIMPLEC算法, 通过对物理模型进行网格划分建立数值计算模型. 为了保证计算的精度, 在靶丸及其附近的气体

区域网格进行了加密处理. 经过网格优化和无相关性验证后, 网格总量约为1, 300, 000, 如图2所示. 计算中给定的边界条件如下:

- 1) 冷冻壁末端给定定温边界条件, 并使得 D-T 冰层内表面温度正好处于三相点 19.7 K 附近;
- 2) 在整个黑腔组件外壁面给定 60 K 黑体辐射边界条件;
- 3) D-T 冰层给定体积热为 $50,000 \text{ W/m}^3$ ^[18], D-T 气体给定体积热为 50 W/m^3 ;
- 4) 不考虑各部分接触的热阻;
- 5) 不考虑黑腔内气体密度的变化, 根据 Boussinesq 假设计算气体浮升力时除外.

3 计算结果与讨论

3.1 黑腔中的自然对流

由引言所言, 黑腔内靶丸的温度不均匀性主要来源于黑腔结构和自然对流换热. 为了考察自然对流换热效应对靶丸的影响, 按照给定条件分别计算了有无重力两种情况下黑腔内的温度场, 如图3所示. 在无重力作用时, 即纯导热模式下, 黑腔内的温度场呈现椭圆形分布(图3(a)), 靶丸靠近黑腔中平面的区域, 温度更低, D-T 冰层内表面温度不均

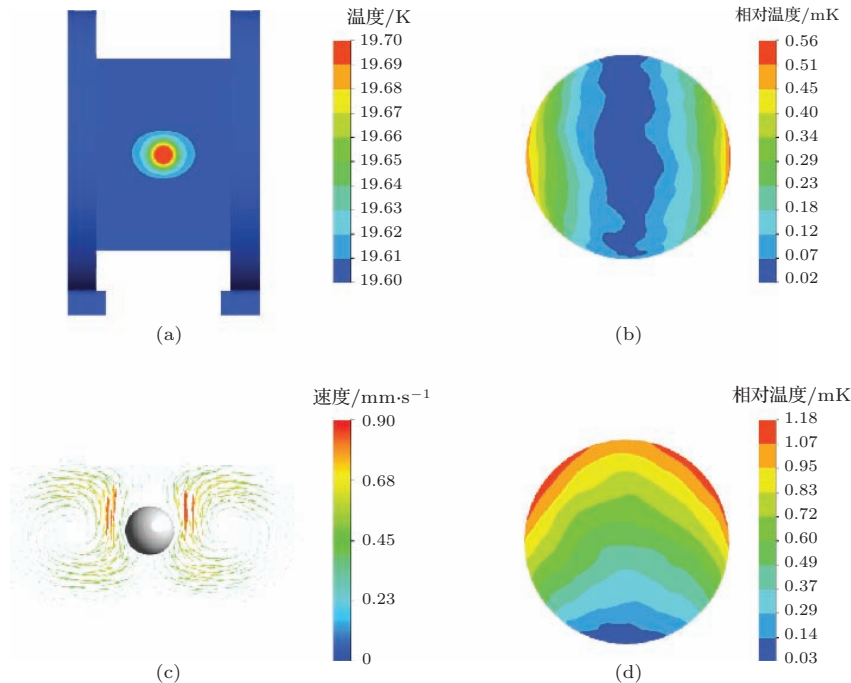


图3 (网刊彩色) 流场和温度分布 (a) 黑腔冷冻靶的温度分布; (b) 无重力时 D-T 冰层内表面温度变化; (c) 有重力时黑腔内流场; (d) 有重力时 D-T 冰层内表面温度变化

Fig. 3. (color online) Temperature and velocity distributions inside the hohlraum: (a) Temperature distribution in the hohlraum; (b) temperature variation at the D-T ice layer inner surface without gravity; (c) free convection flow with gravity; (d) temperature variation at the D-T ice layer inner surface with gravity.

度为0.55 mK(图3(b)). 该温差是由黑腔的非球形结构和 LEH 外辐射所造成的, 称作结构温差. 结构温差可以通过外加热技术来消除, 即在黑腔中平面上施加一定热流, 使得黑腔内为球形的温度场. 在考虑了重力作用引发的自然对流换热效应后(图3(c)), 冰层内表面温度分布发生变化(图3(d)). 典型的黑腔内的流场和温度场分布可做如下的定性解释: 靠近靶丸的气体由于温度较高受到浮升力向上流动, 在与黑腔上壁面接触后气体被冷却, 流速减小, 当到达 LEH 附近时流速减至最小, 热传导占据主要作用, 随后气体沿着黑腔下壁面流回中平面, 开始了新的循环. 自然对流的结果使得靶丸下半部分的换热增强, 热阻减小, 温度较高; 下半部分的换热减弱, 热阻增加, 温度较低, 最终 D-T 冰层内表面温度不均匀度增大到 1.15 mK. 对比结构温差, 可知自然对流换热效应造成的温度不均匀性为 0.60 mK, 略大于黑腔结构所导致的温度不均匀性.

3.2 填充气体的影响

衡量自然对流强弱的一个重要无量纲参数是瑞利数(Rayleigh Number, Ra), 其定义为

$$Ra = \frac{\rho^2 C_p g \beta \Delta T L^3}{\mu \lambda}, \quad (4)$$

其中 ΔT 为流体和壁面之间的温差, L 为特征长度, 选为黑腔直径. 在特征长度和物性参数一定时, 影响自然对流强弱的因素主要是气体压力(即密度). 为此通过改变氦气压力得到了不同 Ra 数下黑腔内的温度与速度分布. 图4给出了不同 Ra 数二维中平面上(黑腔中轴线与垂直径向所在平面) D-T 冰层内表面温度随方位角的变化. 在 Ra 数小于 60 时, 尽管黑腔内发生微弱自然对流, 冰层内表面温度分布未发生明显变化, 与无重力作用时相同, 即靠近黑腔中部的区域(0° 和 180°) 温度较低, 面向 LEH 两侧的区域(90°) 温度较高. 随着 Ra 数继续增大, D-T 冰层内表面温度分布发生变化, 上部区域($0^\circ-90^\circ$) 温度增大, 而下部区域($90^\circ-180^\circ$) 温度降低. 图5是靶丸外表面局部传热系数随方位角的变化, 其分布与 D-T 冰层内表面温度相反, 即随着方位角先减小到某一极小值然后逐渐增大. 靶丸外表面局部传热系数分布随 Ra 数的变化也与图4相反, 即上半部分随 Ra 数增大而变小, 下半部分则随 Ra 数增大而变大. 局部传热系数分布的

不均匀性与温度分布的不均匀性是相对应的. 例如, 当 Ra 数为 626 为时, 相比纯导热模式, 靶丸顶部(0°) 的传热系数减小了 1.0%, 而靶丸底部(90°) 的传热系数增大了 0.9%, D-T 冰层的温度不均匀性为 1.1 mK; 当 Ra 数增大到 2504 时, 靶丸顶部的传热系数减小了 4.6%, 而靶丸底部的传热系数增大了 2.8%, D-T 冰层的温度不均匀度增大到 4 mK.

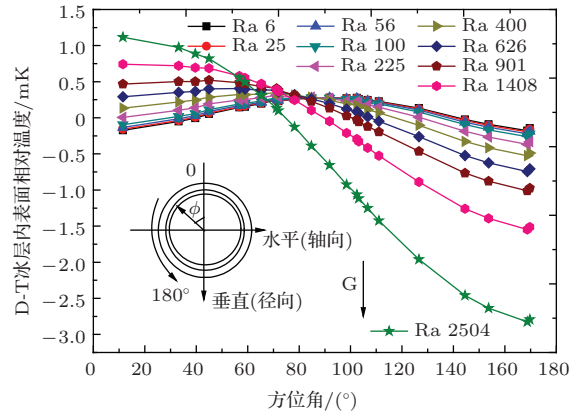


图4 (网刊彩色) 不同 Ra 数 D-T 冰层内表面温度变化与方位角 θ .

Fig. 4. (color online) Temperature variation at the inner surface of D-T ice layer versus azimuth θ , Ra number dependency.

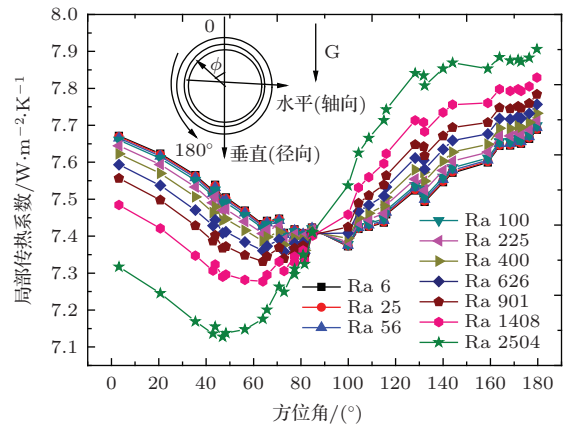


图5 (网刊彩色) 不同 Ra 数靶丸外表面局部传热系数与方位角 θ

Fig. 5. (color online) Local heat transfer coefficient at the outer surface of the capsule versus azimuth θ , Ra number dependency.

物性参数同样影响黑腔内的自然对流强弱. 为此, 分别考察了氦气、氦氢混合气体(等摩尔混合)和氢气三种气体, 它们在 20 K 时的物性如表 1 所示. 三种气体不同压力时 D-T 内表面温差变化如图 6 所示. 从图中可以看出, 当压力较小时, 冰层内表面温差并没有明显增加, 当压力增大到一定值后, 温度不均匀性才开始增大. 氦气、氦氢混合气

体和氢气温度不均匀性开始增加时所对应的压力分别为 12 kPa, 10 kPa 和 4 kPa, 其对应的 Ra 数都在 60 左右, 这与图 4 所示的温差开始增加所对应的 Ra 数是一致的. 氢气更容易发生自然对流是由于其黏性系数和热扩散能力比氦气小. 因此, 为了在更大的压力范围内避免自然对流对靶丸温度不均匀性的影响, 应该选择氦气或者含低氢气组分的氦氢混合气体.

表 1 不同气体在 20 K 的热物性 [19]
Table 1. Thermal properties of different gases (20 K).

	$k/W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}$	$C_p/J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}$	$\mu/kg\cdot m^{-1}\cdot s^{-1}$
氦气	0.0261	5205	3.55×10^{-6}
氦/氢	0.0218	6984	2.51×10^{-6}
氢气	0.0162	10844	1.04×10^{-6}

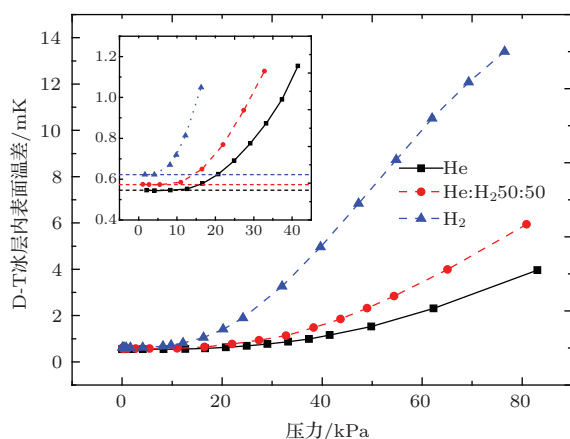


图 6 (网刊彩色) 不同气体工质压力和 D-T 内表面温差的关系 (虚线表示不同气体纯导热时的结构温差, 从小到大依次为 0.55 mK, 0.58 mK, 0.62 mK)

Fig. 6. (color online) Temperature variation at the inner surface of D-T ice layer versus pressure for different gases. The dash lines represent the temperature variations caused by the hohlraum's structure, which are 0.55 mK, 0.58 mK and 0.62 mK respectively.

3.3 黑腔布置朝向的影响

由于低温系统设计和靶丸表征的需要, 实验装置中黑腔是按照轴向水平进行布置, 即重力方向沿黑腔径向, 以上的讨论也是在这种情况下进行的. 与之不同的是, NIF, LMJ 的黑腔冷冻靶是按照轴向垂直进行布置, 即重力方向沿黑腔轴向. 这种布置朝向的差异会影响黑腔内的流场和温度分布. 图 4 给出了黑腔垂直布置时的流场及 D-T 冰层内表面温度分布. 通过与图 2 对比发现, 两种情况下的流场和温度分布存在明显区别. 黑腔水平布置

比垂直布置时自然对流更强, 造成的温度不均匀性也更大. 两种情况下最大流速分别为 0.91 mm/s 和 0.53 mm/s, D-T 冰层内表面温差分别为 1.15 mK 和 0.96 mK. 此外, 黑腔布置朝向对温度分布同样产生影响. 水平布置时 (图 3 (d)), 温度不均匀性沿着黑腔径向, 面向 LEH 两侧温度对称; 垂直布置时, 温度不均匀性沿着轴向. 这种温度分布上的区别将影响利用外加热技术来克服对流抑制的有效性.

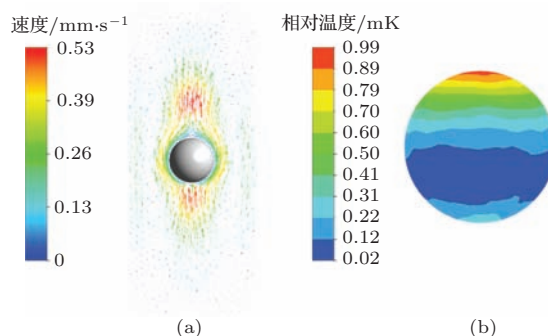


图 7 (网刊彩色) 黑腔垂直布置时的流场及 D-T 冰层内表面温度分布
Fig. 7. (color online) Velocity distribution inside the hohlraum and D-T layer temperature profile inside a vertical orientated hohlraum.

3.4 自然对流的抑制

内爆物理设计要求黑腔中的气体压力不能过小, 这时需要通过减小特征长度来抑制自然对流, 即通过对黑腔进行分区. 分区是通过靶丸支撑薄膜和对流抑制薄膜结构来实现的. 靶丸支撑包括单薄膜结构和双薄膜结构, 其中双薄膜结构为目前 NIF 和 LMJ 黑腔冷冻靶所采用, 它将靶丸从主流区域中隔离. 对流抑制薄膜是在支撑薄膜的基础上进一步对黑腔进行分区, 按照对流抑制薄膜不同数量和位置, 将分区结构分为四种情况进行讨论, 即无薄膜、靠近靶丸的一对薄膜、靠近 LEH 的一对薄膜、两对薄膜. 因为工艺复杂, 实现难度大, 更多数量的分区不做讨论. 依据不同的支撑薄膜和对流抑制薄膜结构, 共得到了 8 种分区方案, 如图 8 所示. 考虑黑腔的两种布置朝向, 一共有 16 种情况. 图 9 给出了不同情况下 D-T 冰层内表面温度变化. 从图中得到以下几点结论: 1) 分区方法在黑腔垂直布置时更为有效; 2) 靠近靶丸的一对薄膜 (方案 2) 比靠近 LEH 的一对薄膜 (方案 3) 效果更好; 3) 双薄膜结构 (B) 比单薄膜结构 (A) 效果更好, 特别是当黑腔水平布置时更加明显.

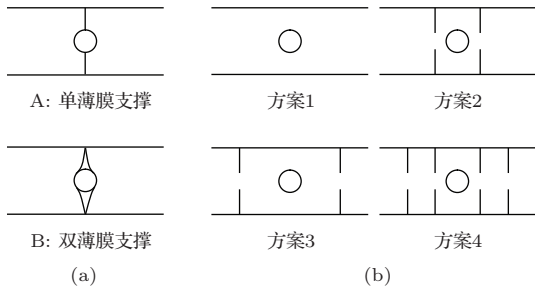


图8 黑腔内不同分区方案

Fig. 8. Different cases of hohlraum fragment.

总体而言,当黑腔垂直布置时,通过合理的分区(B+方案2或方案4)可以有效的消除对流换热效应对靶丸的影响;而黑腔水平布置时,即使采取七分区分区方案(B+方案4),自然对流换热的影响也不能完全消除.图10给出了七分区分区时黑腔不同朝向时的流线分布.从图中可以看出,在黑腔水平布置时,靶丸周围仍然存在一定的对流;而在黑腔垂直布置时,靶丸周围的对流可以忽略不计.

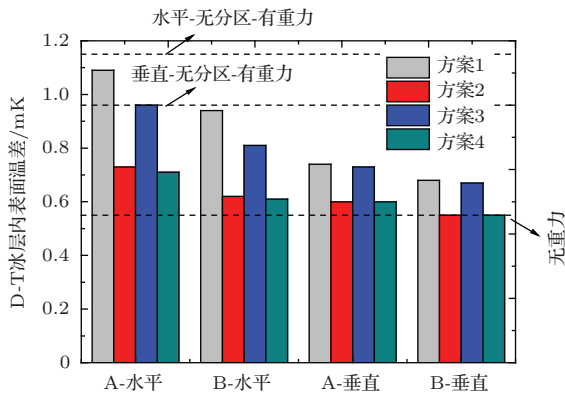


图9 (网刊彩色) 不同分区方案时 D-T 冰层内表面温差
Fig. 9. (color online) Temperature variations at the inner surface of D-T ice layer for different cases.

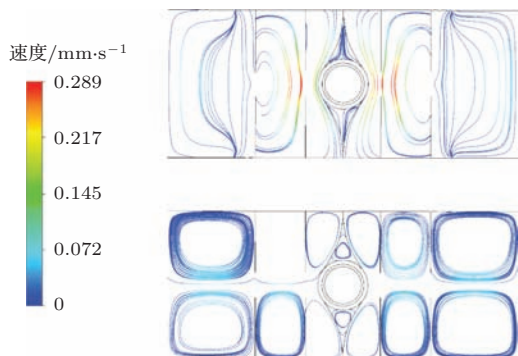


图10 (网刊彩色) 七分区分区黑腔不同朝向时的流线
Fig. 10. (color online) Gas velocity streamline inside a seven-gas-region fragmented hohlraum.

值得注意的是,在黑腔水平布置时,如果采用分区的方法不能完全抑制自然对流,可以使用两个

冷冻壁的温差控制来进一步抵消对流换热造成的温度不均匀性;而在黑腔水平布置时,若自然对流不能得到完全抑制,温差控制方法将不再有效.因此只能将黑腔进一步分区,然而这会增加黑腔结构的复杂性,并导致气体更容易发生泄露.

4 结论

通过对黑腔冷冻靶中热物理问题的三维数值模拟,可以得到了以下几点结论:

- 1) 得到了黑腔内自然对流换热对靶丸温度均匀性产生影响的临界 Ra 数和不同气体的临界压力;
- 2) 为了在尽量大的压力范围内避免自然对流换热的负面效应,应该选择氦气或含氢量低的氦氢混合气体;
- 3) 黑腔水平布置比垂直布置时自然对流效应更加强烈,造成的靶丸的温度不均匀性也更大,且无法通过黑腔分区方法得到有效消除.本文的结论有助于加深对冷冻靶中热物理问题的认识,对黑腔冷冻靶的优化设计和实验的开展具有指导意义.下一步通过引入辅助加热技术,对黑腔冷冻靶进行整体热优化,得到形成均匀温度场的条件,将有助于在实验中实现消除冰层低模粗糙度的目标,推动冷冻靶研究的进一步开展.

参考文献

- [1] 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
- [2] Haan S W, Salmonson J D, Clark D S, Ho D D, Hammel B A, Callahan D A, Cerjan C J, Edwards M J, Hatchett S P, Landen O L, Lindl J D, MacGowan B J, Marinak M M, Munro D H, Robey H F, Spears B K, Suter L J, Town R P, Weber S V, Wilson D C 2011 *Fusion Sci. Technol.* **59** 1
- [3] Hoffer J K, Foreman L R 1988 *Phys. Rev. Lett.* **60** 1310
- [4] Chernov A A, Koziolowski B J, Koch J A, Atherton L J, Johnson M A, Hamza A V, Kucheyev S O, Lugten J B, Mapoles E A, Moody J D, Salmonson J D, Sater J D 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 064105
- [5] London R A, Koziolowski B J, Marinak M M Kerbel G D, Bittner D N 2006 *Fusion Sci. Technol.* **49** 608
- [6] Wang F, Peng X S, Kang D G, Liu S Y, Xu T 2013 *Chin. Phys. B* **22** 115204
- [7] Lei H L, Li J, Tang Y J, Liu Y Q 2009 *Rev. Sci. Instrum.* **80** 033103

- [8] 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]
- [9] Bi P, Lei H L, Liu Y Q, Li J, Yang X D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 062802 (in Chinese) [毕鹏, 雷海乐, 刘元琼, 黎军, 杨向东 2012 物理学报 **61** 062802]
- [10] 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, 李海容, 黄鑫, 余铭铭, 梁建华, 彭述明 2015 物理学报 **64** 015202]
- [11] Sanchez J J, Giedt W H 2003 *Fusion Sci. Technol.* **44** 811
- [12] Sanchez J J, Giedt W H 2003 *Fusion Sci. Technol.* **45** 253
- [13] Giedt W H, Sanchez J J, Bernat T P 2006 *Fusion Sci. Technol.* **49** 588
- [14] Koziowski B J, Mapoles E R, Sater J D, Chernov A A, Moody J D, Lugten J B, Johnson M A 2011 *Fusion Sci. Technol.* **59** 14
- [15] Lallet F, Gauvin C, Martin M, Moll G 2011 *Fusion Sci. Technol.* **59** 171
- [16] Moll G, Martin M, Collier R 2009 *Fusion Sci. Technol.* **55** 283
- [17] Moll G, Martin M, Collier R 2011 *Fusion Sci. Technol.* **59** 182
- [18] Souers P C 1986 *Hydrogen Properties for Fusion Energy* (University of California, Berkeley) pp105
- [19] Chen G B, Bao R, Huang Y H 2006 *Cryogenic Technology: Properties* (Beijing: Chemical Industry Press) p103-112 [陈国邦, 包锐, 黄永华 2006 低温工程技术(数据卷)(北京: 化学工业出版社) 第103—112页]

Numerical simulation of heat transfer and natural convection of the indirect-driven cryogenic target*

Huang Xin[†] Peng Shu-Ming[‡] Zhou Xiao-Song Yu Ming-Ming
Yin Jian Wen Cheng-Wei

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

(Received 12 April 2015; revised manuscript received 7 July 2015)

Abstract

ICF design requires smooth and uniform deuterium-tritium (D-T) ice layers in a spherical shell. Thermal environment around the capsule is the key to reach the low-mode ice layer roughness requirement and obtain a high quality ice layer. In this paper, we present the results of three-dimensional simulation for an indirect-driven cryogenic target, focusing on the issues of heat transfer and natural convection flow inside the hohlraum. A thermal and hydrodynamic calculation is first proposed to investigate the convection heat transfer effect on the D-T ice layer. Comparing the two cases with gravity considered or neglected, we find that the temperature variation at the ice layer inner surface caused by the natural convection flow and the hohlraum's structure are of the same order of magnitude. Then the parameters study on Rayleigh number, which is a dimensionless number associated with free convection, is carried out. Thermal simulations on different Rayleigh number are provided. Temperature variation at the D-T ice layer inner surface is to increase as soon as the Rayleigh number reaches 60. Comparisons among different gases under different operating pressure conditions are made. In order to avoid the convection heat transfer effect in a wide range of pressure, it is necessary to take pure helium or mixture gas with a small amount of hydrogen as the tamping gas. The influence of hohlraum's orientation on the natural convection is also studied. It is found that the convective heat transfer effect in a horizontally orientated hohlraum is stronger than that in a vertical one. Based on these, we discuss the possibility to eliminate the convection flow by partitioning the hohlraum into several regions. The calculated results for several cases of different gas-region models indicate that the convection flow can be eliminated with an appropriate division in a vertically orientated hohlraum but cannot in a horizontally orientated one. The conclusions in this paper have certain guiding significance for further design and experiments of cryogenic target.

Keywords: inertial confinement fusion (ICF), cryogenic target, free convection flow, thermal simulation

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

DOI: 10.7498/aps.64.215201

* Project supported by the National Special Program of China, and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2014 M552382).

[†] Corresponding author. E-mail: xin2008hust@163.com

[‡] Corresponding author. E-mail: pengshuming@caep.cn