

冷冻靶屏蔽罩温度扰动动态特性分析

陈冠华, 李翠, 郭富城, 厉彦忠

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对屏蔽罩温度波动导致冷冻靶燃料冰层均匀性降低的问题, 基于用户自定义函数和离散坐标辐射模型, 研究了辐射环境变化时黑腔冷冻靶系统的温度场动态特性, 得到套筒吸收率和封口膜透射率等参数对靶丸表面温度场稳定性、均匀性的影响规律。结果表明: 屏蔽罩温度波动有两条传播路径, 路径一为屏蔽罩封口膜靶丸, 路径二为屏蔽罩套筒金腔氦气腔靶丸; 典型工况下屏蔽罩振幅 10 K 的温度波动到靶丸外壁时衰减为 0.85 mK, 黑腔系统各表面温度振幅由大到小为靶丸外壁、套筒外壁、套筒内壁、金腔内壁; 当封口膜透射率较小时减小套筒吸收率, 或封口膜透射率较大时增大套筒吸收率, 或减小封口膜透射率, 均可显著提高靶丸表面温度场稳定性和均匀性。

关键词: 低温冷冻靶; 屏蔽罩; 温度扰动; 动态特性; 数值模拟

中图分类号: TL632+.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202106014 **文章编号:** 0253-987X(2021)06-0113-08



OSID 码

Dynamic Thermal Characteristics of Cryogenic Target Under Temperature Disturbance of Thermal Shield

CHEN Guanhua, LI Cui, GUO Fucheng, LI Yanzhong

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

Abstract: Dynamic thermal characteristics of cryogenic targets are studied under conditions of temperature disturbance of the thermal shield. Based on user-defined functions and the discrete coordinate radiation model, a model is numerically developed and the propagation characteristics of the temperature disturbance in the hohlraum system are studied. The influences of the thermal mechanical package (TMP) shell absorptivity and the sealing film transmissivity on the stability and uniformity of the capsule surface temperature field are obtained. The results show that the temperature fluctuation of the shield has two paths. The first path is the shield-sealing film-capsule and the second one is the shield-TMP-gold hohlraum wall-helium chamber-capsule. Under typical operating conditions, the temperature fluctuation of shield with amplitude 10 K is attenuated to 0.85 mK at the outer wall of the target. The temperature amplitude of each surface of the hohlraum system varies from large to small; the outer wall of the target, the outer wall of TMP, the inner wall of TMP, and the inner wall of gold hohlraum. The stability and uniformity of the capsule temperature is significantly improved by decreasing the TMP shell absorptivity when the sealing film transmissivity is small, or increasing the TMP shell absorptivity when the sealing film transmissivity is large, or decreasing the sealing film transmissivity.

Keywords: cryogenic target; thermal shield; temperature disturbance; dynamic characteristics; numerical simulation

为应对能源危机,惯性约束核聚变(ICF)作为一种高效且安全的聚变能获取途径,被寄予替代传统能源的希望^[1-2]。已有多个国家在进行相关的课题研究,如美国国家点火装置(NIF)、法国兆焦耳激光装置,特别是NIF近期的实验成果加强了人们对惯性约束聚变的信心^[3-6]。惯性约束聚变有冷冻靶和非冷冻靶两种靶型,由于冷冻靶优良的点火性能,国际上ICF实验普遍选用冷冻靶进行实验^[7-8]。

靶丸内的固体燃料(DT)具有冰层厚度均匀、表面光滑的特点,是ICF实验成功点火的决定性因素。通常,燃料冰层厚度的均匀性需大于99%,冰层表面的粗糙度需小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ 。然而,燃料冰固有的相变特性使冰层均匀性和靶丸表面温度场均匀性密切相关,这对温度场均匀性提出了严苛的要求。经计算,靶丸表面最大温差通常要小于 0.1 mK 才能确保冰层均匀性大于99%^[9-10]。屏蔽罩是冷冻靶的外围隔热结构,将其内部抽真空并使用制冷机维持低温可以屏蔽外界常温辐射。在点火实验过程中,脉冲制冷机冷头温度扰动、气体泄漏等会使屏蔽罩的温度产生波动,通过辐射传热的方式影响靶丸表面温度分布,威胁靶丸表面温度分布的均匀性^[11-16]。因此,研究屏蔽罩温度波动对控制冷冻靶温度具有重要意义^[17-19]。文献[20]对冷臂温度波动进行了研究,获得了通过降低黑腔填充气体压力、提高氦气填充份额以改善靶丸温度均匀性的方法。除此以外,国内外鲜有研究者关注外界温度扰动的影响,屏蔽罩温度波动更是少有报道。

本文使用CFD数值模拟软件研究了屏蔽罩温度波动时冷冻靶温度场的动态特性,获得了屏蔽罩温度波动的传播路径,分析了套筒吸收率和封口膜透射率对靶丸温度振幅和温差的影响规律,为优化温度控制指明了方向。

1 冷冻靶模型

1.1 物理模型

参考美国国家点火装置(NIF)设计的冷冻靶结构见图1,其中 d 为金腔内径。金腔高度与内径之比为1.85。靶丸的结构如图2所示。金腔内填充压力为 50 kPa 的氦气。封口膜是半透明的高分子聚合薄膜,将黑腔两端的激光入射口(LEH)密封,其透射率小于1,以降低外部辐射对靶丸温度场的干扰。凸环连接金腔和套筒,冷环是套筒与冷臂接触的位置,为黑腔系统提供冷量。靶丸外部是材料为碳氢化合物的烧蚀层,中间是DT燃料冰层,内部

是DT燃料气体。DT燃料冰层的厚度固定,即忽略DT固体和气体间的相变迁移影响。为方便说明,使用地理学术语和角度对靶丸表面进行标注,如图2所示, -90° 为南极点, 0° 为赤道, 90° 为北极点,重力方向为 -90° 方向。

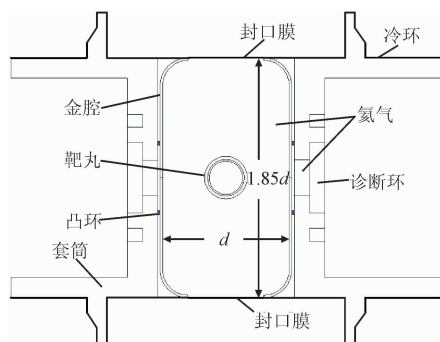


图1 冷冻靶结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cryogenic target structure

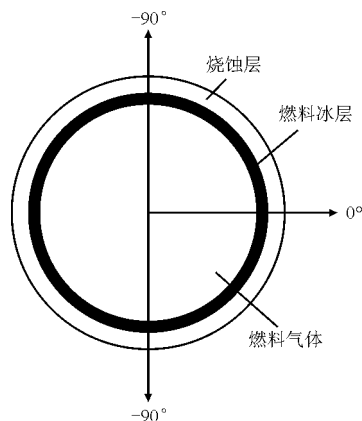


图2 靶丸结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of capsule

由于激光入射口的存在,外部热辐射对冷冻靶有着显著影响。为保证靶丸表面温度场的均匀性,需要在冷冻靶外部设置低温真空屏蔽罩。本文建立了具有屏蔽罩的二维轴对称非稳态冷冻靶模型,如图3所示。黑腔系统位于屏蔽罩中心,圆柱形屏蔽罩高度为 40 mm ,半径为 20 mm 。屏蔽罩内为真空度 101 kPa 的干空气。

1.2 基本方程和边界条件

质量守恒方程、动量方程以及能量方程如下

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (1)$$

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

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla(\rho u T) = \nabla\left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla T\right) + \Phi \quad (3)$$

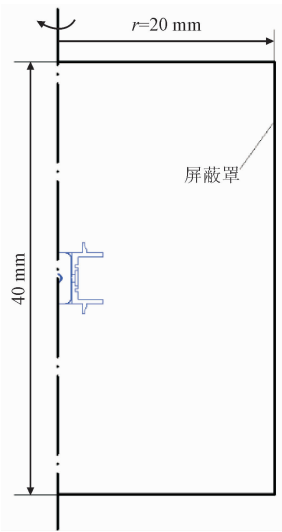


图 3 屏蔽罩模型
Fig. 3 Model of thermal shield

式中: ρ 、 t 、 u 、 T 、 p 分别为密度、时间、速度、温度和压力; Φ 、 c_p 、 β 、 μ 、 λ 分别表示内热源项、比定压热容、热膨胀系数、动力黏性系数和导热系数; T_{ref} 是参照温度。使用 Boussinesq 假设处理气体密度。使用离散坐标(DO)辐射模型处理半透明介质。DO 模型使用辐射传输方程。沿 S 方向传播的辐射方程为

$$\nabla [I(\mathbf{r}, \mathbf{S}) \mathbf{S}] + (\alpha + \sigma_s) I(\mathbf{r}, \mathbf{S}) = \omega^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{S}) \Phi(\mathbf{S}, \mathbf{S}) d\Omega \quad (4)$$

式中: I 和 Ω 分别为辐射强度和辐射立体角; $\mathbf{r}$ 和 $\mathbf{S}$ 分别为辐射方位角法向向量和辐射沿程长度向量; α 、 n 、 σ_s 分别为吸收系数、折射系数和散射系数; σ 为黑体辐射常数。

典型工况的边界条件为:屏蔽罩温度以 120 K 为平衡点随时间推移进行振幅为 10 K 的周期性正弦波动,其发射率和吸收率均为 0.05。DT 冰层和 DT 气体的 β 衰变热分别为 50 000、50 W/m³。冷环定壁温 18 K。靶丸表面、金腔表面、套筒表面吸收率分别为 1、0.02、0.5,封口膜透射率为 0.1。

1.3 无关性验证

图 4 为二维轴对称模型的网格划分图,考虑到冷冻靶与屏蔽罩尺寸差异较大,为保证计算的准确性,在局部区域进行了网格加密。

图 5 为典型工况下靶丸表面最大温差随网格数的变化情况,验证所使用的网格数分别是 21 474、78 843、133 620、204 325、273 864。当网格数增大到 133 620 后,靶丸表面最大温差稳定在 0.193 mK。因此,为保证计算精度并减少计算量,选用网格数 133 620 进行计算。

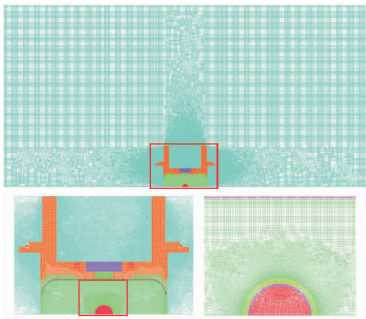


图 4 二维轴对称模型计算网格
Fig. 4 Grid of two-dimensional axisymmetric model

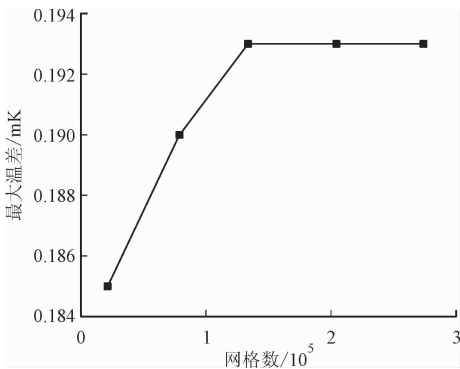


图 5 网格无关性验证
Fig. 5 Grid-independence verification

2 结果与分析

2.1 屏蔽罩温度扰动传播规律分析

由于屏蔽罩内抽真空进行隔热,因此导热和对流传热非常微弱。取典型工况初始时刻的套筒外壁面辐射换热热流和自然对流换热热流进行对比,分别为 3.34、0.000 2 W/m²,自然对流热流约为辐射热流的十万分之六,可忽略不计。因此,屏蔽罩和黑腔系统之间主要以辐射方式进行换热。屏蔽罩辐照黑腔系统主要有两个方向,一个是从外部辐照黑腔系统的外表面,即套筒外壁进入氦气腔,另一个是通过半透明的封口膜进入氦气腔内,辐照腔内的靶丸外壁和金腔内壁。由于靶丸外壁吸收率为 1,金腔吸收率为 0.02,进入氦气腔的辐射主要被靶丸所吸收,可以忽略金腔吸收的辐射,因此,黑腔系统主要有 2 个辐射接收面——套筒外壁和靶丸外壁,屏蔽罩通过对套筒外壁和靶丸外壁施加辐射热流影响黑腔系统。当屏蔽罩表面温度进行周期性的正弦波动时,套筒外壁和靶丸外壁吸收的辐射热流也随之波动,从而使套筒和靶丸温度场也进行周期性的波动。套筒和靶丸的温度波动通过导热和对流在黑腔系统内传播并叠加,引起黑腔系统各处温度波动。下面

以典型工况为例分析屏蔽罩温度扰动传播的路径和特点。

使用稳态结果作为初始条件,在屏蔽罩表面加载周期性变化的正弦扰动。靶丸表面平均温度周期性变化如图 6 所示,温度波动在第 3 周期后保持稳定,因此取第 3 周期之后的数据进行动态特性分析。

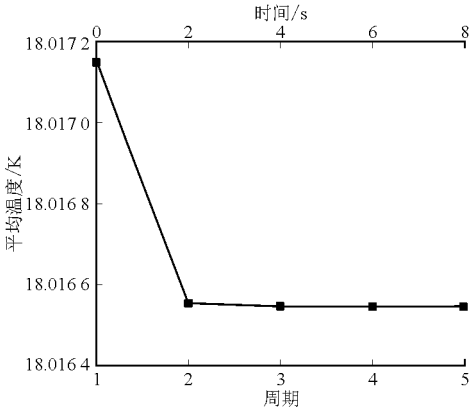


图 6 各周期初始时刻靶丸表面平均温度
Fig. 6 Average surface temperature of capsule at the initial time of each cycle

将靶丸外壁、金腔内壁、套筒内壁和套筒外壁依次标记为 A、B、C、D,在各表面分别选取 5 个点,从上到下依次编号,如图 7 所示,对各点温度进行监控。图 8a 为监控点 A3、B3、C3、D3 的温度随时间的波动,可以看到各点温度波动的波形是正弦波,与屏蔽罩温度波动的波形、周期保持一致,屏蔽罩温度波动到达靶丸时振幅从 10 K 衰减到 0.85 mK。

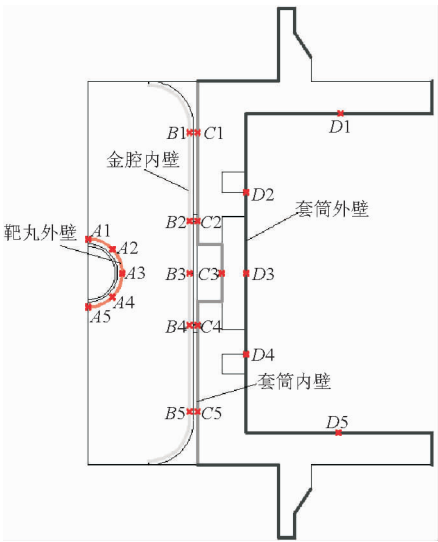
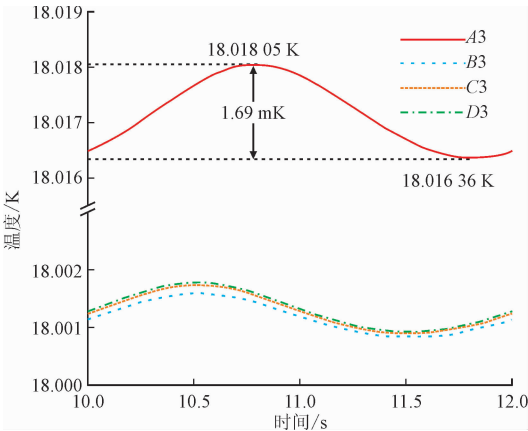


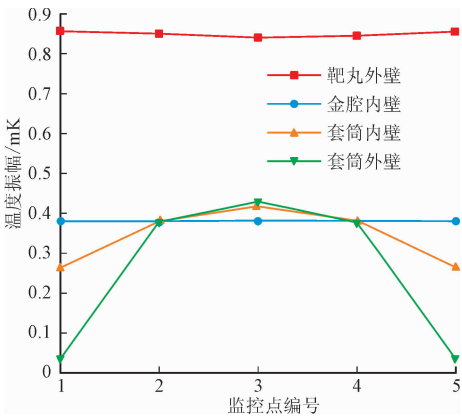
图 7 监控点示意图
Fig. 7 Schematic diagram of monitoring points

图 8b 展示了典型工况下各表面监控点的温度振幅,由图可知,靶丸外壁上振幅远大于其余各面,

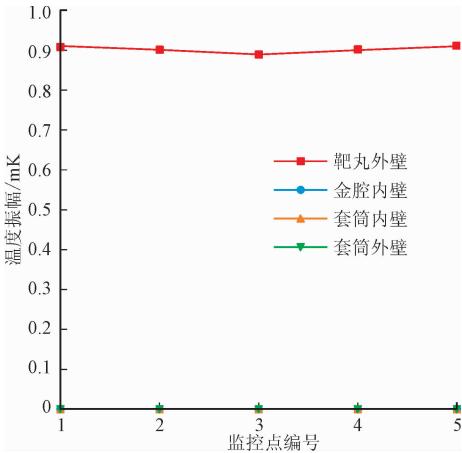
南北两极振幅略大于赤道。这说明靶丸接收屏蔽罩辐射产生的波动振幅较大,套筒温度波动对靶丸影响较小,传播路径一对靶丸温度波动的影响大于传播路径二,靶丸南北两极由于接收辐射较多且远离金腔,温度波动更剧烈。套筒内外壁上不同位置的振幅差别较大,中间位置振幅大于上下两端,这是因为冷环温度恒定,抑制了附近温度场的波动,越靠近冷环,受到的抑制作用越大,振幅越小。以 C3、D3



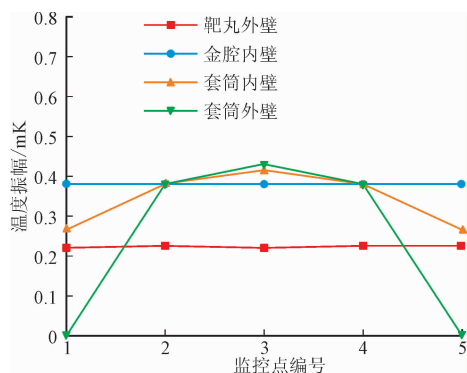
(a)典型工况下各表面监控点 3 的温度



(b)典型工况下各监控点温度振幅



(c)套筒吸收率为 0 时各监控点温度振幅



(d) 靶丸吸收率为 0 时各监控点温度振幅

图 8 不同工况下各监控点温度波动情况

Fig. 8 Temperature fluctuation of monitoring points under different conditions

振幅表征套筒内外壁温度波动,则振幅从大到小的顺序为靶丸外壁、套筒外壁、套筒内壁、金腔内壁。从套筒外壁、套筒内壁、金腔内壁振幅递减可知,靶丸温度波动振幅虽大,但并没有对金腔产生足够的影响,金腔主要受套筒波动影响。金腔上各位置温度振幅一致,且与 C2、D2、C4、D4 处振幅相同,尤其是金腔上 B1 和 B5 点与套筒内壁 C1 和 C5 点距离很近,中间隔着氦气,但是振幅差异却很大,表明温度波动主要以固体导热的方式从套筒向金腔传播。

为研究靶丸和套筒温度波动对黑腔系统的影响,将靶丸外壁和套筒外壁其中一个的吸收率设置为 0 来屏蔽其辐射换热,此时黑腔系统中的温度波动只由另一个表面吸收的辐射热流引起。图 8c 为屏蔽套筒外壁辐射换热时各表面监控点的温度振幅情况,从图中可看到,套筒外壁吸收率设为 0 后,靶丸外壁振幅略微升高,而其余三个面的振幅降则降到 10^{-5} mK 以下,可以忽略不计。可见靶丸的温度波动向套筒方向传播时,在氦气腔受到氦气极大的削弱,到达金腔内壁时已接近消失,对金腔和套筒温度场基本没有影响。图 8d 展示了屏蔽靶丸外壁辐射换热时各监控点的温度振幅情况,图中金腔内壁、套筒内壁和套筒外壁的各监控点振幅和典型工况中一致,靶丸外壁振幅从典型工况的 0.85 mK 降至 0.22 mK。以 C3、D3 的温度振幅表征套筒内外壁的温度波动,振幅由大到小依次为套筒外壁、套筒内壁、金腔内壁、靶丸外壁,波动由套筒到靶丸逐渐衰减。波动振幅由套筒外壁 D3 至金腔内壁 B3 衰减了 11.6%,由金腔内壁 B3 至靶丸外壁 A3 衰减了 42.1%,这是因为套筒和金腔固体导热的传热效果强于氦气对流换热。波动振幅由套筒外壁 D3 至靶

丸外壁 A3 衰减 48.8%,套筒温度波动使靶丸温度波动振幅产生的增量为自身振幅的 51.2%。

综上,屏蔽罩温度扰动传播主要有两条路径,一条为屏蔽罩-封口膜-靶丸串联,称为路径一,另一条为屏蔽罩-套筒-金腔-氦气腔-靶丸串联,称为路径二,两条路径起点都是波动源头屏蔽罩,终点都是靶丸,为并联关系,相互影响。

2.2 影响因素分析

由于屏蔽罩和黑腔系统之间仅通过辐射进行换热,因此传播路径上的材料辐射特性对温度扰动传播有决定性的影响。路径一上的材料辐射特性有屏蔽罩发射率、封口膜透射率和靶丸吸收率。屏蔽罩表面通常已经过加工打磨,表面光滑,发射率较低。靶丸在点火过程需要吸收高能射线,故要保持较高的吸收率。封口膜通过镀涂层来控制透射率,一部分辐射穿过半透明薄膜进入腔内,另一部分被镀层反射。因此,封口膜透射率是路径一上最具影响力的材料辐射特性。路径二上的材料辐射特性有屏蔽罩发射率、套筒吸收率和反射率。屏蔽罩发射率如前文所述,实际中通常较小。套筒吸收率决定了套筒外壁吸收的辐射热流大小,对路径二上温度扰动传播影响很大。特别的是套筒反射率,作为路径二上的材料辐射特性,还影响着路径一,因为经套筒反射的辐射有一部分会经屏蔽罩二次反射投射到封口膜上,所以套筒反射率影响着进入氦气腔的辐射量。由于不透明表面的吸收率与反射率之和恒为 1,因此将吸收率与反射率放在一起讨论。通过改变封口膜透射率和套筒吸收率,探究削弱温度扰动传播、提高靶丸温度稳定性和均匀性的方法。

2.2.1 套筒吸收率 研究发现,封口膜透射率取不同值时,套筒吸收率对靶丸温度场的影响不同。在封口膜透射率分别为 0.01 和 0.1 下改变套筒吸收率,取值为 0、0.1、0.5 和 1。图 9 展示了封口膜透射率分别为 0.01 和 0.1 下靶丸平均温度波动振幅和最大温差随套筒吸收率的变化情况。从图中可看到,当封口膜透射率为 0.01 时,增大套筒吸收率可以使靶丸温度振幅和最大温差增大;套筒吸收率从 0 增大到 1 时,靶丸温度振幅增加 6.19 倍,最大温差增加 10.9%。当封口膜透射率为 0.1 时,增大套筒吸收率会使靶丸温度振幅和最大温差减小,套筒吸收率从 0 增大到 1 时,靶丸温度振幅下降 11.9%,最大温差下降 23.6%。

封口膜透射率分别取 0.01 和 0.1 时,靶丸温度振幅和最大温差随套筒吸收率变化有不同趋势,这

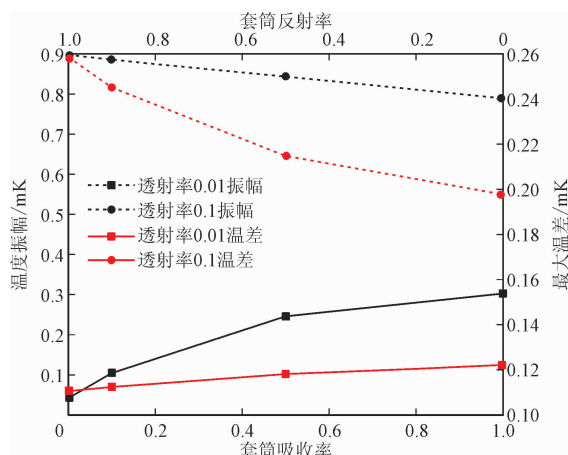


图9 靶丸温度振幅和最大温差随套筒吸收率的变化

Fig. 9 Variation of temperature amplitude and maximum temperature difference of capsule with TMP absorptivity

与套筒吸收率和反射率对传播路径的不同影响有关。对于传播路径二,套筒吸收率越大,套筒外壁吸收的辐射热流越大,传播路径二上的温度波动越强。对于传播路径一,套筒反射率越大,套筒反射的辐射越多,通过屏蔽罩二次反射而投射到封口膜上的辐射越多,透过封口膜进入黑腔的辐射越多,靶丸吸收的辐射热流越大,从而温度波动越强。由于吸收率与反射率之和恒为1,因此当吸收率增大时,反射率减小(图9),传播路径一温度波动减弱,传播路径二温度波动加强。而靶丸温度波动由路径一和路径二的波动叠加而成,当路径一的影响较大时,靶丸温度波动随套筒吸收率增大而减弱;当路径二的影响较大时,靶丸温度波动随套筒吸收率增大而加强。当封口膜透射率为0.01时,通过封口膜进入黑腔的辐射较少,传播路径一对靶丸温度波动影响小,传播路径二对靶丸的影响起主导作用,靶丸温度振幅随套筒吸收率增大而增大。封口膜透射率为0.1时,进入黑腔的辐射较多,路径一对靶丸温度波动影响起主导,靶丸温度振幅随套筒反射率增大而增大。

图10为封口膜透射率为0.1、套筒吸收率为1时,分别处于波峰、平衡点和波谷的靶丸表面温度。从图中可看到,当温度波动时,靶丸表面温度分布特征不变,都是南北极温度高、赤道温度低,北极温度略高于南极。燃料衰变产生的能量和外界辐射输入的热量使靶丸温度高于金腔,冷环通过金腔和氦气冷却靶丸。由于金的导热性好,距离金腔壁面近的靶丸赤道受到的冷却作用大,温度较低,距离金腔壁面远的靶丸,南北两极受到的冷却作用小,温度较

高。北极温度高于南极与腔内自然对流有关,在对流中,氦气被靶丸加热而上升,被金腔冷却而下降,形成了完整的环流,流经北极的氦气经过靶丸的加热,使得北极温度略高于南极。因此,靶丸表面最高温度位于北极,最低温度位于赤道,靶丸表面最大温差即靶丸北极温度与赤道温度之差。当靶丸与金腔的温差增大时,由于靶丸赤道离金腔最近,受到的影响最大,北极离金腔远,受到的影响小,因此赤道与北极的温差变大,即靶丸表面最大温差变大。

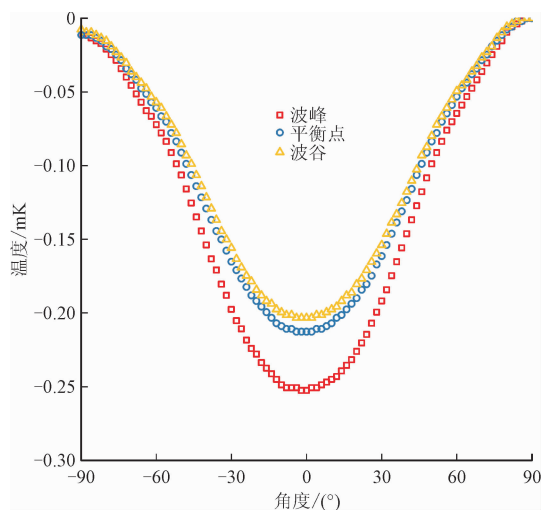
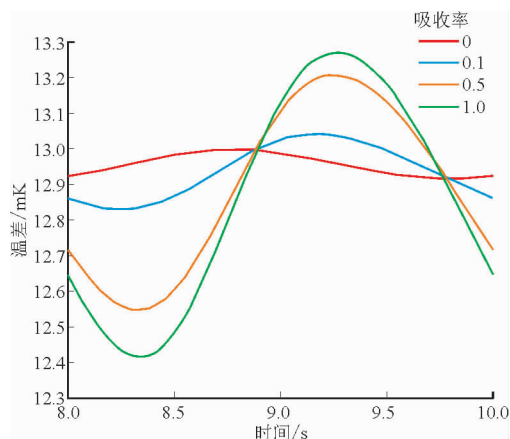


图10 封口膜透射率为0.1、套筒吸收率1时靶丸表面温度分布
Fig. 10 Surface temperature distribution of capsule when the sealing film transmissivity is 0.1 and the TMP absorptivity is 1

图11a是封口膜透射率0.01时,不同套筒吸收率下靶丸外壁与金腔内壁温差随时间的变化,可以看到,靶丸外壁与金腔内壁的温差处于正弦形式的波动中,随着套筒吸收率增大,靶丸外壁与金腔内壁的最大温差增大,与靶丸表面最大温差的变化趋势一致。图11b是封口膜透射率0.1时,不同套筒吸



(a) 封口膜透射率为0.01

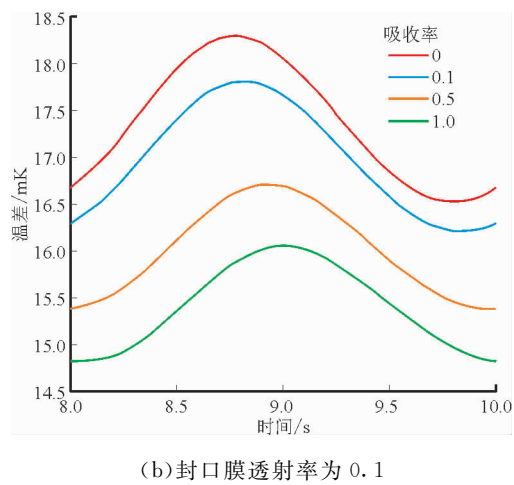


图 11 不同套筒吸收率下靶丸外壁与金腔内壁温差波动
Fig. 11 Temperature difference fluctuation between the outer wall of capsule and the inner wall of gold cavity under different TMP absorptivity

收率下靶丸外壁与金腔内壁温差随时间的变化,可见随着套筒吸收率增大,靶丸外壁与金腔内壁的最大温差减小,与靶丸表面最大温差的变化趋势一致。

2. 2. 2 封口膜透射率 与套筒吸收率与反射率类似,封口膜透射率影响传播路径一,封口膜反射率影响传播路径二,封口膜透射率增大时,传播路径一的波动加强,传播路径二的波动减弱。这使得套筒吸收率取不同大小时,靶丸温度振幅和最大温差随封口膜透射率的变化可能呈不同趋势。为此,在套筒吸收率分别为 0.5 和 1 下,改变封口膜透射率,取值为 0.01、0.1、0.5、1。

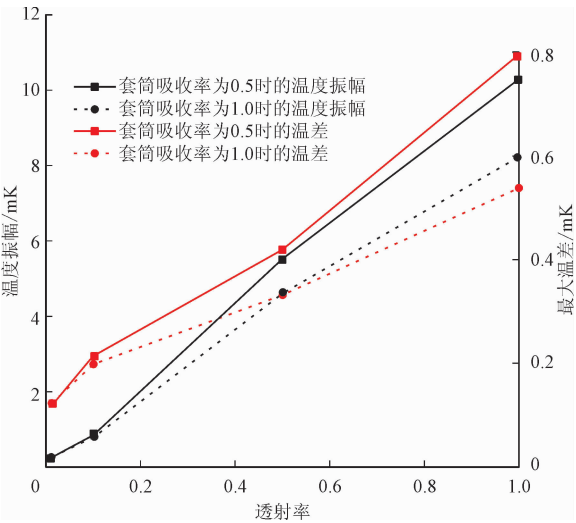


图 12 靶丸温度振幅和最大温差随封口膜透射率的变化
Fig. 12 Variation of temperature amplitude and maximum temperature difference of capsule with sealing film transmissivity

图 12 展示了套筒吸收率分别为 0.5 和 1 时靶丸表面温度振幅和最大温差随封口膜透射率的变化。从图中可知,当套筒吸收率为 0.5 时,靶丸振幅和最大温差随封口膜透射率的增大而增大,封口膜透射率从 0.01 增大至 1 时,靶丸温度振幅增加 40.87 倍,最大温差增加 5.73 倍;当套筒吸收率为 1 时,靶丸振幅和最大温差随封口膜透射率的增大而增大,封口膜透射率从 0.01 增大至 1 时,靶丸温度振幅增加 26.26 倍,最大温差增加 3.41 倍。

在套筒吸收率分别为 0.5 和 1 时,靶丸温度振幅和最大温差都随封口膜透射率的增大而增大,说明封口膜透射率对靶丸温度场的影响大于套筒吸收率,封口膜透射率是传播路径上最重要的影响因素。

3 结 论

(1)屏蔽罩和黑腔系统之间主要通过辐射方式进行换热。黑腔系统主要有两个辐射接收面——套筒外壁和靶丸外壁,屏蔽罩通过对套筒外壁和靶丸外壁施加辐射热流影响黑腔系统。相应地,屏蔽罩温度扰动有两条传播路径,路径一是屏蔽罩-封口膜-靶丸,路径二是屏蔽罩-套筒-金腔-氦气腔-靶丸。

(2)典型工况下,屏蔽罩振幅 10 K 的温度波动到靶丸外壁时衰减为 0.85 mK,黑腔系统内各表面温度振幅由大到小为靶丸外壁、套筒外壁、套筒内壁、金腔内壁。靶丸温度波动对金腔、套筒温度波动基本没有影响;套筒温度波动对金腔、靶丸温度波动有显著影响,套筒温度波动使靶丸温度波动振幅产生的增量为自身振幅的 51.2%。

(3)在封口膜透射率 0.01 条件下,套筒吸收率从 0 增大到 1 时,靶丸温度振幅增加 6.19 倍,最大温差增加 10.9%;在封口膜透射率 0.1 条件下,套筒吸收率从 0 增大至 1 时,靶丸温度振幅降低 11.9%,最大温差降低 23.6%。为提高靶丸温度场稳定性和均匀性,当封口膜透射率较小时,应减小套筒吸收率,当封口膜透射率较大时,应增大套筒吸收率。

(4)当套筒吸收率分别为 0.5 和 1 时,靶丸温度振幅和最大温差都随封口膜透射率的增大而增大,封口膜透射率对靶丸温度场的影响大于套筒吸收率,是传播路径上影响最大的辐射特性。为提高靶丸温度场的稳定性和均匀性,应尽量减小封口膜透射率。

参考文献:

[1] CHEN Weiming, KIM H, YAMAGUCHI H. Renew-

- able energy in eastern Asia: renewable energy policy review and comparative SWOT analysis for promoting renewable energy in Japan, South Korea, and Taiwan [J]. *Energy Policy*, 2014, 74: 319-329.
- [2] 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.
- [3] EDWARDS M J, PATEL P K, LINDL J D, et al. Progress towards ignition on the national ignition facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(7): 070501.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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(1): 155.
- TANG Yongjian, JIANG Weiyang. Cryogenic targets fabrication methods for inertial confinement fusion [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 1998(1): 155.
- [9] MOLL G, MARTIN M, BACLET P. Thermal simulations of the LMJ cryogenic target [J]. *Fusion Science and Technology*, 2007, 51(4): 737-746.
- [10] MOLL G, CHARTON S. Update on thermal and hydrodynamic simulations on LMJ cryogenic targets [J]. *Fusion Science and Technology*, 2004, 45(2): 233-244.
- [11] 李翠, 陈洵, 厉彦忠. 冷冻靶屏蔽罩开启过程瞬态特性分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2019, 53(7): 1-7.
- LI Cui, CHEN Xun, LI Yanzhong. Transient thermal characteristics of cryogenic target during removal of thermal shield [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2019, 53(7): 1-7.
- [12] 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.
- [13] 殷阁媛, 厉彦忠, 郑江, 等. 辐射换热对冷冻靶温度影响的数值分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27(6): 062007.
- YIN Geyuan, LI Yanzhong, ZHENG Jiang, et al. Numerical analysis of radiation heat transfer effects on cryogenic target temperature [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(6): 062007.
- [14] MARTIN M, GAUVIN C, CHOUX A, et al. The cryogenic target for ignition on the LMJ: useful tools to achieve nominal temperature and roughness conditions of the DT solid layer [J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49(4): 600-607.
- [15] 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.
- [16] ZHAO Jun, LI Yanzhong, LI Cui. Numerical analysis of dynamic heating modulation during rapid cooling of fuel layer in an indirect-drive cryogenic target [J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2019, 114: 22-30.
- [17] MOTOJIMA O, OHYABU N, KOMORI A, et al. Recent advances in the LHD experiment [J]. *Nuclear Fusion*, 2003, 43(12): 1674-1683.
- [18] HAMAGUCHI S, IMAGAWA S, OBANA T, et al. Performance of upgraded cooling system for lhd helical coils [C] // AIP Conference Proceedings 2008. New York, USA: AIP Publishing, 2008: 10.1063.
- [19] LI Cui, LI Yanzhong, CHEN Pengwei, et al. Study on propagation of temperature disturbance in indirect-drive inertial confinement cryogenic target system [J]. *Refrigeration Science and Technology*, 2017: 434-440.
- [20] LI Cui, CHEN Pengwei, ZHAO Jun, et al. Thermal distribution and cooling performance of cryogenic target under stable and fluctuating cooling conditions [J]. *Fusion Engineering & Design*, 2018, 127: 23-33.

(编辑 亢列梅)