

DOI: 10.7652/xjtuxb201907001

冷冻靶屏蔽罩开启过程瞬态特性分析

李翠, 陈洵, 厉彦忠

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对冷冻靶屏蔽罩开启过程温度场发生突变导致冰层质量恶化的问题,数值研究了屏蔽罩开启过程中冷冻靶温度场的瞬态特性,并提出了温度控制优化方案。数值模拟基于 Boussinesq 假设和离散坐标辐射模型,借助考虑辐射环境变化的冷冻靶多重屏蔽罩非稳态模型,得到了黑腔气体压力、封口膜透射率等参数的影响规律,并分析比较了在不同冷环控制方案下开罩的数值结果。研究表明:屏蔽罩开启后,靶丸表面绝对温度急剧升高,均匀性迅速恶化;氦气压力增大时,开罩过程的靶丸表面绝对温度无明显变化,但最大温差显著增大;减小封口膜透射率,可有效减小靶丸表面温升和最大温差;存在一个最优冷流量,使屏蔽罩开启过程中温升和最大温差在较宽的透射率范围内满足打靶要求,所满足的透射率范围相对于定壁温开罩增加了 19 倍。所提优化方案对冷冻靶温度控制方面具有指导意义,可为顺利打靶提供一定的先决条件。

关键词: 低温冷冻靶;屏蔽罩;透射率;瞬态特性;数值模拟

中图分类号: TL632 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)07-0001-07

Transient Thermal Characteristics of Cryogenic Target During Removal of Thermal Shield

LI Cui, CHEN Xun, LI Yanzhong

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

Abstract: In the present study, the transient thermal characteristics of cryogenic target during the thermal shield removal process are numerically studied, and optimal temperature control schemes are proposed to improve the target temperature distribution and to avoid ice quality deterioration. An unsteady numerical model is established for the cryogenic target with multiple thermal shields based on the Boussinesq assumption and the discrete coordinate radiation model. The transient thermal characteristics of the cryogenic target during the removal of thermal shield are analyzed under different hohlraum pressures and sealing film transmittances, and the numerical results of removal thermal shield under different control schemes of cooling rings are analyzed. The results show that the temperature on the capsule surface rises precipitously in accompany with the deterioration of temperature uniformity after removing the thermal shield. As the helium pressure in hohlraum increases, the maximum temperature difference on the capsule surface increases dramatically while the peak temperature has no significant variation. The decrease of sealing film transmittance is conducive to restrain the rises of both the maximum temperature and the maximum temperature difference. There is an optimal heat flux of cooling

收稿日期: 2018-12-12。 作者简介: 李翠(1982—),女,讲师。 基金项目: 国家重大专项资助;国家自然科学基金资助项目(51506158)。

网络出版时间: 2019-04-16

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20190415.1400.002.html>

ring to meet the thermal requirements of ignition in a wider transmittance range which is 19 times more than that under constant temperature of cooling rings. The results can be served as a guideline for thermal preconditioning of cryogenic target before ignition.

Keywords: cryogenic target; thermal shield; transmittance; transient characteristic; numerical simulation

惯性约束核聚变(ICF)是一种高效率且能安全的获取聚变能的方法,是在人类面临能源危机时迫切想发展的一种能源替代方法^[1-2]。美国等多个国家都在积极开展这一课题的研究,尤其是美国国家点火装置(NIF)的最新实验结果坚定了人们发展惯性约束核聚变的信念^[3-4]。靶是实现惯性约束核聚变的核心部分,分为非冷冻靶和冷冻靶两种。由于在同等条件下冷冻靶在聚变时的中子产额多于非冷冻靶的,同时压缩靶丸需要的能量较少,冷冻靶已成为国际上实现 ICF 点火的首选靶型^[5]。

为在冷冻靶上实现 ICF 点火,对靶丸质量有严格的要求:靶丸内部形成均匀且表面光滑的固体燃料(DD)冰层,即冰层均匀性大于 99% 和表面粗糙度小于 $1\ \mu\text{m}$ ^[6]。在制备燃料冰层过程中,外界辐射将通过两端激光入射口(LEH)进入黑腔,增大了靶丸温度场的不均匀性,从而给均匀冰层的形成带来困难,因此需要在冷冻靶外建立低温屏蔽罩结构,来减弱制备燃料冰层过程中外界辐射对冷冻靶的影响^[7-11]。文献[12-13]研究表明,开罩前可通过减小黑腔中氦气压力、降低封口膜的透射率改善靶丸表面温度的均匀性,从而获得均匀的燃料冰层。为顺利完成 ICF 点火,需在打靶前将低温屏蔽罩稳定的完全移除,否则会造成设备的不可逆损失,这一过程大约需要持续 $5\ \text{s}$ ^[14]。在移除低温屏蔽罩的过程中即开罩过程,冷冻靶暴露在外界环境中接受外界辐射,易造成冷冻靶温度场突变从而恶化冰层质量。研究表明,为在屏蔽罩开启后顺利打靶,靶丸表面最高温度在开罩过程中变化量应小于 $0.25\ \text{K}$ ^[15]。2006 年,美国学者通过传热学理论计算出了开罩后冷冻靶所允许暴露在外界环境中的时间,所允许暴露时间过短无法满足 $5\ \text{s}$ 的需求,但是由于计算过程简化过多,计算结果的准确性有待考证^[15]。

本文借助 CFD 仿真平台数值研究了开罩过程冷冻靶温度场的瞬态特性,获得了冷冻靶极限暴露时间,并对冷冻靶结构参数和温度控制方案进行优化,使屏蔽罩开启后冷冻靶温度场在需要的暴露时间内满足打靶要求。

1 冷冻靶数值模拟

1.1 冷冻靶模型

本文冷冻靶结构参考美国国家点火装置^[3],其主体包括铝套筒(TMP)、金制黑腔以及位于黑腔中心的靶丸,如图 1 所示。黑腔高度与内径之比为 1.85,两端激光入射口(LEH)采用厚度为 $50\ \text{nm}$ 的高分子聚合膜密封,内部填充一定压力的氦气,用于传递热量并减少激光入射期间的等离子扩散。两条辅助加热带在铝套筒上对称布置,其距离与腔体高度的比值为 0.7,冷环与铝套筒紧密接触,为系统提供低温,靶丸位于黑腔中心,为多层球壳结构,最外层称为烧蚀层,厚度为 $0.12\ \text{mm}$,材料为碳氢化合物,向内依次是 DD 燃料冰层和 DD 气体,燃料冰层厚度为 $0.06\ \text{mm}$,如图 2 所示。

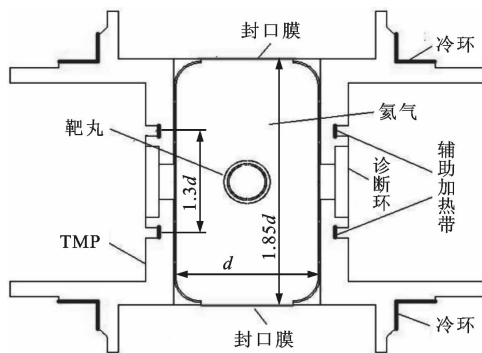


图1 冷冻靶结构示意图

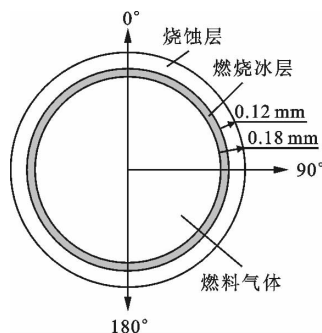


图2 靶丸结构示意图

辐射对冷冻靶系统的影响非常显著,为形成均匀的燃料冰层,需要在冷冻靶外部设置真空屏蔽罩,以减弱外界辐射对冷冻靶丸冰层质量的影响。打靶

之前随着屏蔽罩开启,外界环境辐射直接投射进入黑腔,靶丸表面温度分布会急剧恶化。为使靶丸表面的温度波动满足技术指标,本文建立了具有多重屏蔽罩的冷冻靶非稳态模型,来模拟开罩过程辐射环境变化对冷冻靶温度场的影响,如图 3 所示。圆柱形内罩为 120 K 的低温屏蔽罩,半径为 23.91 mm,高为 40 mm,球形外罩代表外界环境,温度为 300 K,半径为 200 mm。在制备燃料冰层过程中,冷冻靶接受低温屏蔽罩的辐射,开罩后冷冻靶暴露在外界环境的辐射中,辐射温度由屏蔽罩温度 120 K 变为环境温度 300 K。

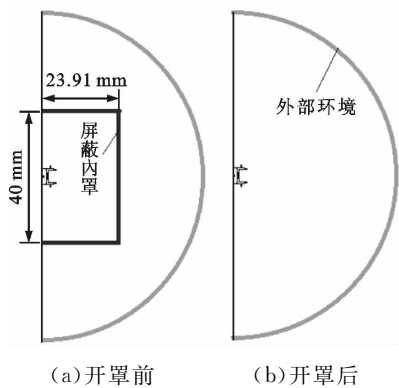


图 3 模拟开罩过程模型

根据上述结构和参数,在 Gambit 中建立二维轴对称模型并划分结构性网格,如图 4 所示。由于冷冻靶相对于屏蔽罩尺寸较小,网格尺寸从靶丸到屏蔽罩逐渐变大,并对黑腔壁面和靶丸表面附近网格进行加密处理,以准确模拟黑腔内氦气的自然对流。

1.2 控制方程和边界条件

能量方程、动量方程以及质量守恒方程为

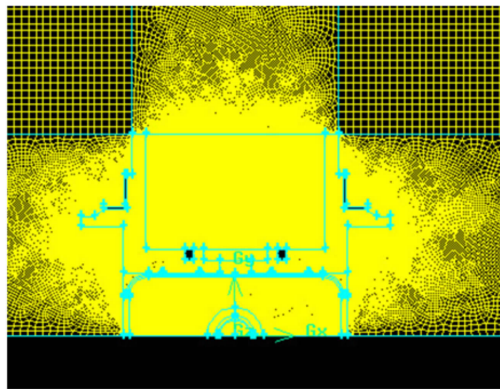
$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla(\rho u T) = \nabla \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla T \right) + \Phi \quad (1)$$

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

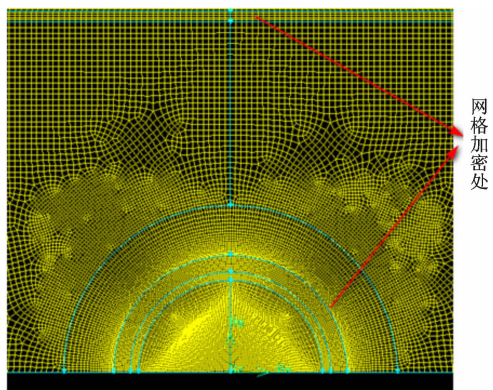
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (3)$$

式中: t 、 ρ 、 u 、 p 、 T 分别为时间、密度、速度、压力和温度; k 、 μ 、 β 、 c_p 、 Φ 分别为导热系数、动力黏性系数、热膨胀系数、比定压热容和内热源项; T_{ref} 为参考温度。由于黑腔内的氦气和靶丸中心的 DD 气体温度变化较小,密度变化也小,在动量方程中使用了 Boussinesq 假设。由于腔体两端的封口膜为半透明介质,模拟中采用了离散坐标(DO)辐射模型。DO 模型将方向上的辐射传递方程(RTE)视为场方程

$$\nabla \cdot (I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \mathbf{s}) + (\alpha + \sigma_s) I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) =$$



(a) 网格尺寸分布



(b) 网格加密处理

图 4 二维轴对称模型计算网格

$$n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}') \Phi(\mathbf{s}, \mathbf{s}') d\Omega' \quad (4)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为辐射方位角法向向量; $\mathbf{s}$ 为沿程长度向量; α 为吸收系数; n 为折射系数; σ_s 为散射系数; σ 为黑体辐射常数; I 为辐射强度; Ω 为辐射立体角。

在屏蔽罩开启前,通过红外加热来实现冰层均化,与 DT 固体的衰变热相当的情况下,DD 固体的体积热源为 49.1 kW/m³。在开罩过程中,除辐射环境发生改变外,取消红外加热即燃料冰层和气体都无体积热源,冷环温度恒定为 18.4 K,假设燃料冰层厚度均匀,其他为耦合边界条件。

1.3 无关性验证

网格无关性验证结果如图 5 所示,在其他条件不变的情况下,当网格数增加到 462 175 时,计算结果趋于稳定,因此选用的网格数为 462 175。随着球形外罩半径的增大,靶丸表面最高温度、最大温差增大,当球形外罩半径大于 200 mm 时,随球形外罩的增大冷冻靶开罩结果不变,本文模型选择半径为 200 mm 的球形外罩。当球形外罩的半径增大时,其表面热阻减小,当减小到一定值时,其接触热阻可忽略不计,即可代表无限大的外界环境,冷冻靶面对

不同球形外罩尺寸的开罩结果如图6所示。

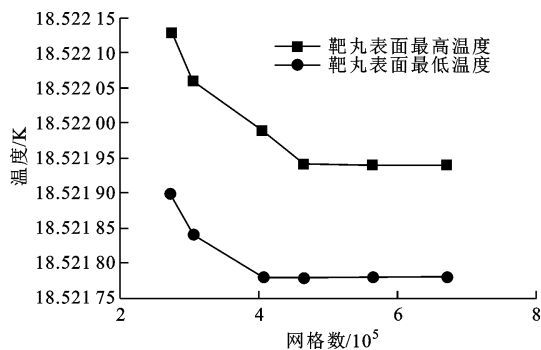
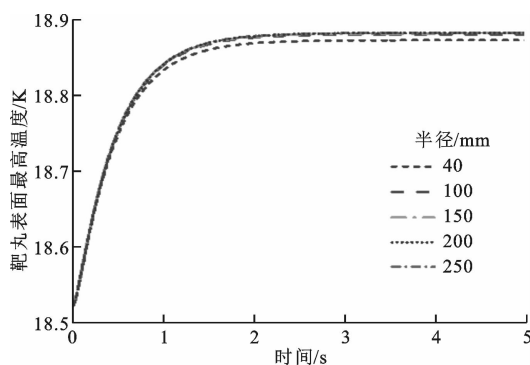
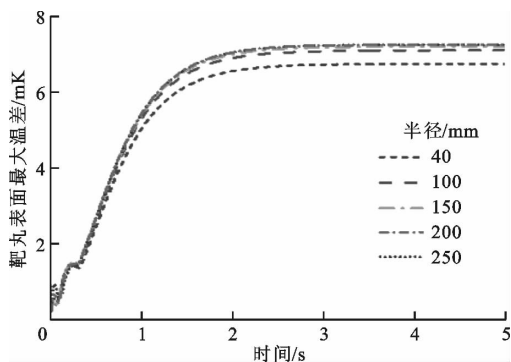


图5 网格无关性验证



(a) 靶丸表面最高温度



(b) 靶丸表面最大温差

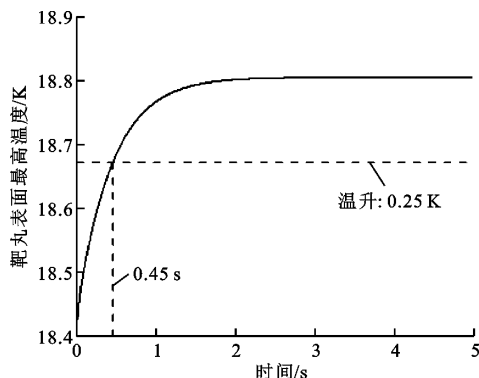
图6 球形外罩尺寸无关性验证

2 计算结果与讨论

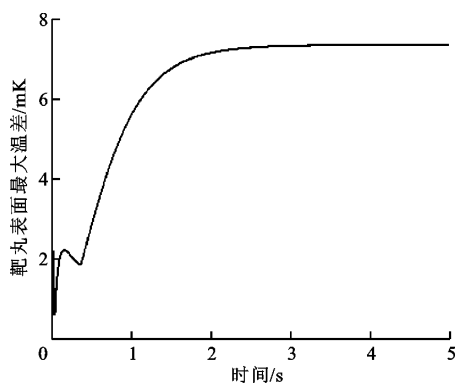
2.1 屏蔽罩开启过程温度场动态特性

屏蔽罩开启后靶丸表面温度随时间的变化如图7所示,过程中冷环温度恒定为18.4 K,氦气压力为70 kPa, LEH 封口膜透射率为0.1。由图7可知:开启后辐射对温度场的影响显著,开罩初期,冷环提供的冷流量不足以平衡通过 LEH 的封口膜进入腔体内部的辐射量,导致靶丸表面温度急剧升高;同时外部辐射使腔内的自然对流运动加强,靶丸表面最大温差急剧增大,温度场均匀性恶化。到开罩后期,冷

环提供的冷流量逐渐增加,最终与外界环境所给冷冻靶的辐射量相平衡,因此靶丸表面温度升高的趋势变缓,最终趋于稳定,靶丸表面最大温差也趋于定值,冷冻靶温度场不再随时间改变。



(a) 靶丸表面最高温度



(b) 靶丸表面最大温差

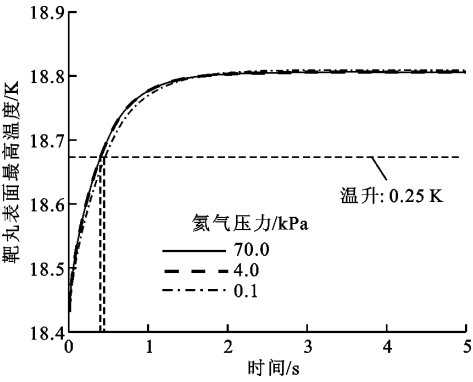
图7 开罩过程靶丸表面温度变化

2.2 影响因素分析

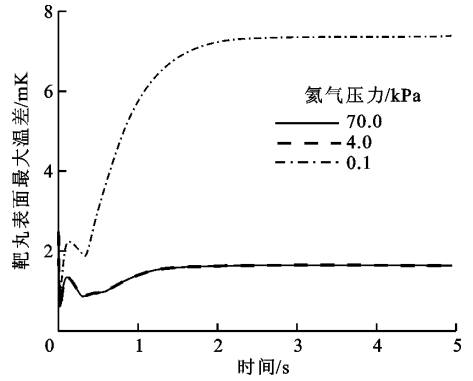
屏蔽罩开启后进入腔体里的辐射热流密度与冷冻靶系统构造及材料的辐射参数特性密切相关。通过改变参数和改善材料的辐射特性,探索削弱腔体内部辐射强度、减小开罩过程中靶丸表面温升、提高温度分布均匀性的有效方法。

2.2.1 黑腔内氦气压力 作为连接铝套筒和靶丸的唯一热介质,黑腔内氦气压力的大小直接影响氦气的导热系数以及自然对流的强度,进而对开罩过程温度场动态特性产生影响。为研究氦气压力变化对开罩后冷冻靶温度场的影响,模拟了封口膜透射率为0.1,氦气压力分别为70、4、0.1 kPa时靶丸表面温度随开罩时间的变化,结果如图8所示。

当黑腔内氦气压力足够小时,开罩过程中靶丸表面温度场随氦气压力改变无明显变化,如在氦气压力为0.1、4 kPa下开启屏蔽罩,靶丸表面最高温度以及最大温差随时间的变化规律基本一致。由图

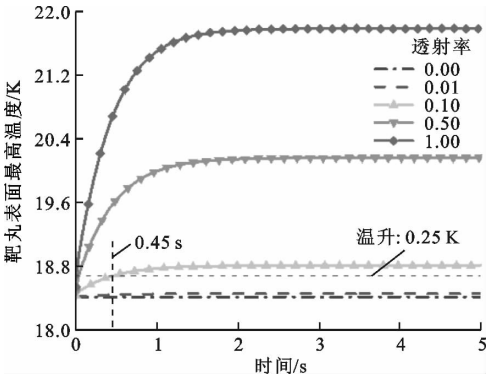


(a)靶丸表面最高温度

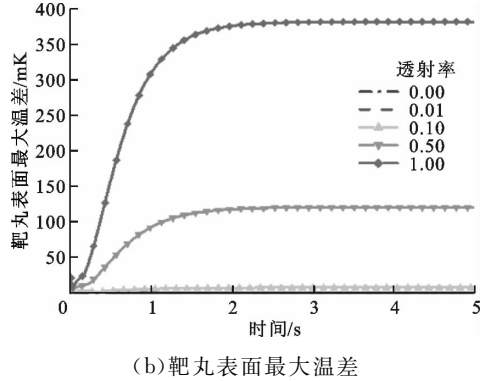


(b)靶丸表面最大温差

图 8 不同氦气压力下靶丸表面温度场的变化



(a)靶丸表面最高温度



(b)靶丸表面最大温差

图 9 不同封口膜透射率下靶丸表面温度场的变化

8 可知:当氦气压力从 4 kPa 增加到 70 kPa 时,由于黑腔内的自然对流增强,靶丸表面温度的最大温差显著增大,靶丸表面温度分布趋于稳定时,表面最大温差从 1.64 mK 增加到 7.38 mK,增加了 350%,极大的破坏了靶丸表面温度的均匀性;由于氦气的导热系数也在增加,靶丸与铝套筒的换热有所增强,靶丸表面的温升略有减小。因此,改变氦气压力对当开罩过程的温升控制无明显改善。

2.2.2 封口膜透射率 激光入射口的封口膜为半透明介质,其透射率在很大程度上决定了进入腔体的辐射热流密度。氦气压力为 70 kPa,封口膜透射率分别为 0、0.01、0.1、0.5、1,靶丸表面温度场随时间的变化如图 9 所示。由图 9 可知:随封口膜透射率增大,到达靶丸表面的外界辐射量越多,在开罩初期靶丸表面最高温度也增加的越快,达到稳定时最高温度温升越大;并且随着封口膜透射率的增大,黑腔内自然对流强度增强,靶丸表面最大温差增大,当封口膜透射率从 0 增加到 1,开罩结束后最大温差从 0.015 2 mK 增加到 381.770 mK。

开罩结束后最高温度变化量随透射率的拟合曲线如图 10 所示。由图 10 可知:封口膜透射率从 0

增加到 1,温升从 3.5 mK 增加到 3 251.3 mK,随透射率增加呈直线增长趋势;当氦气压力为 70 kPa 时,为将最高温度变化量控制在 0.25 K 以内,需要使封口膜透射率小于 0.065。

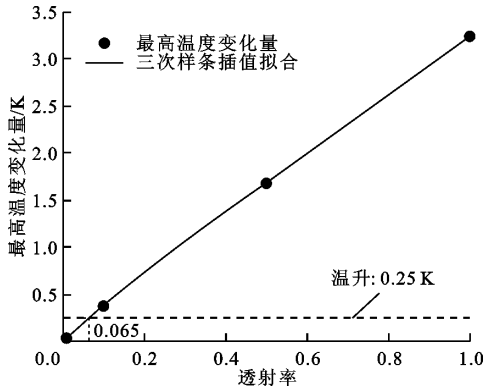
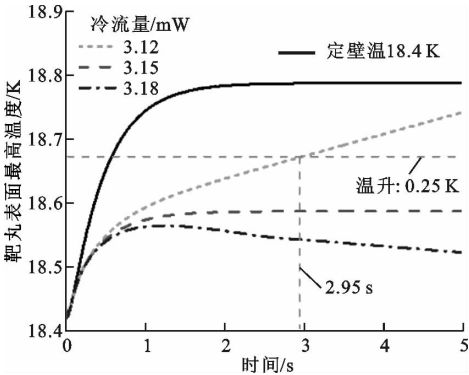


图 10 开罩结束时最高温度变化量随透射率的变化

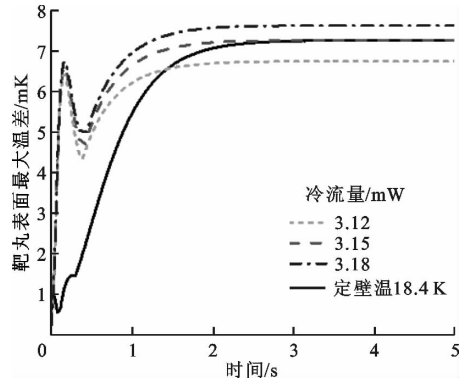
2.3 冷环控制方案

在氦气压力为 70 kPa,封口膜透射率为 0.1 的工况下,对控制温度、控制冷流量两种冷环控制方案进行了对比分析,结果如图 11 所示。屏蔽罩开启过程中,若冷环温度保持恒定(18.4 K),靶丸表面最高温度变化量最终将大于 0.25 K,温度场稳定时冷环输入的冷流量为 3.15 mW。由图 11 可知:在冷

环采用冷流量控制方案时,在 3.15 mW 下开启屏蔽罩,温升会趋于定值,但最高温度变化量将小于 0.25 K,符合打靶要求;当冷环的冷流量小于 3.15 mW 时,冷环提供的冷流量不足以平衡辐射热量,靶丸表面温度会持续升高直至温升大于 0.25 K;当冷流量大于 3.15 mW 时,靶丸表面温度先升高后降低,温升满足要求,但靶丸表面最大温差会升高,均匀性变差。综合考虑温升要求和靶丸表面温度均匀性,在冷环提供的冷流量与外界所给的辐射热量平衡时的冷流量,为最佳冷流量。



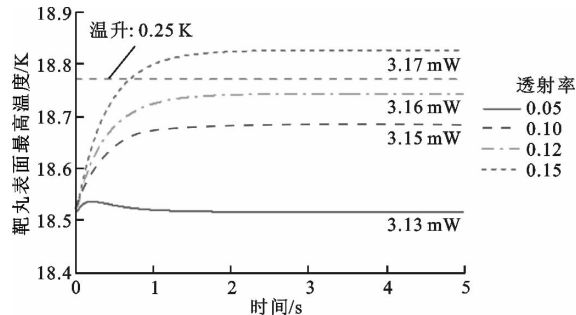
(a)靶丸表面最高温度



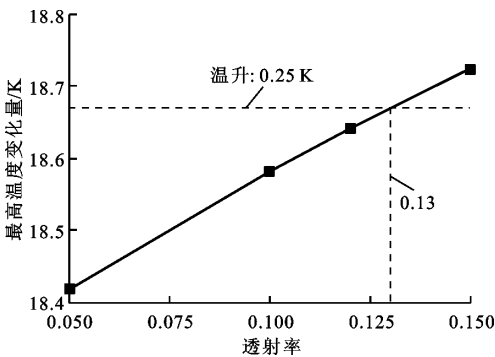
(b)靶丸表面最大温差

图 11 不同冷环控制方案下靶丸表面温度场的变化

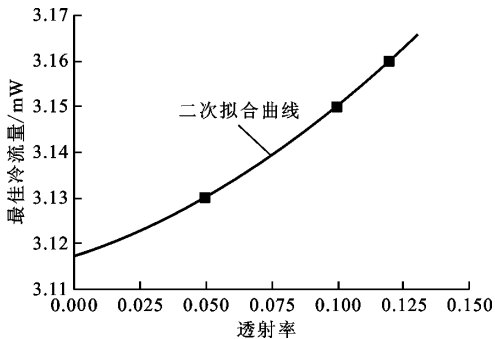
不同封口膜透射率的最佳冷流量以及在最佳冷流量下的开罩结果如图 12 所示。由图 12 可知:在



(a)靶丸表面最高温度随开罩时间的变化



(b)开罩结束时靶丸表面最高温度变化量



(c)最佳冷流量随透射率的变化

图 12 不同封口膜透射率的最佳冷流量以及开罩结果

最佳冷流量下进行开罩,在开罩后期靶丸最高温度总是趋于稳定;当冷环采用最佳热流控制方式时,满足冷冻靶所允许暴露时间超过 5 s 的临界透射率从恒定壁温的 0.065 增加到 0.13;当透射从 0.05 增加到 0.15,冷环最佳冷流量从 3.13 mW 增加到 3.15 mW,二者满足二次函数关系。

3 结 论

本文以 ICF 冷冻靶技术为背景,采用数值模拟的方法,对冷冻靶开罩过程温度场的动态特性进行计算分析,重点研究了屏蔽罩开启过程影响靶丸表面温度场动态变化的因素,并提出了冷环优化控制方案。针对本文所研究的冷冻靶模型,有如下主要结论:

(1)屏蔽罩开启后,通过 LEH 封口膜进入腔体内部的辐射热流急剧增加,导致靶丸表面绝对温度升高,均匀性恶化,靶丸表面最高温度以及最大温差随时间增加最终趋于定值;

(2)氦气压力增大时,靶丸表面最大温差增大,绝对温度无明显变化。当氦气压力从 4 kPa 增加到 70 kPa,靶丸表面最大温差从 1.64 mK 增加到 7.38 mK,增加了 350%;

(3)封口膜透射率减小,靶丸表面绝对温度和最大温差都随之减小,当透射率小于0.065时,靶丸表面最高温度变化量小于0.25 K,满足打靶要求;

(4)采用热流控制方案,可使靶丸在开启过程中维持在较低的温差及温度水平,在更宽的透射率范围内满足打靶要求。

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(11):1571-1583.
JIANG Shaoen, DING Yongkun, MIAO Wenyong, et al. Research progress on laser inertial confinement fusion experiment in China [J]. Science in China: Series G Physics, Mechanics & Astronomy, 2009(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. Discussion on inertial confinement nuclear fusion [J]. Physics, 1999, 28(3): 142-152.
- [3] 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 & Technology, 2003, 44(4): 811-819.
- [4] 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): 041006.
- [5] 唐永建,蒋伟阳. ICF 低温冷冻靶制备技术 [J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(1): 155-160.
TANG Yongjian, JIANG Weiyang. Preparation technology of ICF cryogenic target [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(1): 155-160.
- [6] MOLL G, MARTIN M, BACLET P. Thermal simulations of the LMJ cryogenic target [J]. Fusion Science & Technology, 2007, 51(4): 737-746.
- [7] MARTIN M, GAUVIN C, CHOUX A, et al. A way to reach the cryogenic's temperature and roughness requirements for the laser mega joule facility [J]. Fusion Science & Technology, 2007, 51(4): 747-752.
- [8] 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 & Technology, 2006, 49(4): 608-615.
- [9] 彭述明,张伟光,龙兴贵,等. DT 冷冻靶分层技术进展 [J]. 低温工程, 2008(6): 60-63.
PENG Shuming, ZHANG Weiguang, LONG Xingguo, et al. Layering technology of DT cryogenic targets [J]. Cryogenics, 2008(6): 60-63.
- [10] MOLL G, BACLET P, MARTIN M. Recent results in thermal and hydrodynamic simulations of cryogenic target for LMJ [J]. Fusion Science & Technology, 2006, 49(4): 574-580.
- [11] 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, 2018, 53(1): 1-7.
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 Technology, 2018, 53(1): 1-7.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 田苗苗. 冷冻靶保护罩开启机构稳定性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 1-4.
- [15] LONDON R A, MOODY J D, SANCHEZ J, et al. Thermal infrared exposure of cryogenic indirect drive ICF targets [J]. Fusion Science & Technology, 2006, 49(5): 581-587.

(编辑 赵炜)