

辐射条件下冷冻靶靶丸表面及充气管 温度特性数值研究

郭富城, 李 翠, 陈冠华, 厉彦忠*

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要:在惯性约束核聚变冰层均化实验阶段,观测到充气管内冰晶无法保持,从而不能堵管,靶丸直接与高温氘气源连接,无法继续实验。为解决难以堵管的问题,本文建立了三维冷冻靶系统计算模型,研究了辐射条件下屏蔽罩温度、封口膜透射率及铝套筒表面发射率等因素对冷冻靶靶丸表面及充气管沿程温度特性的影响规律。结果表明:改变封口膜透射率能有效降低靶丸与充气管连接处的温度,在本文讨论的边界条件下,封口膜透射率大于0.025时靶丸与充气管连接处温度相对较低,晶核可维持,充气管能被堵管;而改变屏蔽罩温度及铝套筒表面发射率等做法对靶丸与充气管连接处的温度降低作用不明显,充气管无法被堵管。

关键词:惯性约束核聚变;数值模拟;辐射;温度特性

中图分类号: TB115; TL632

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2020)11-2201-08

doi: 10. 7538/yzk. 2019. youxian. 0790

Numerical Investigation on Temperature Characteristic of Capsule Surface and Filling Tube of Cryogenic Target under Radiation Condition

GUO Fucheng, LI Cui, CHEN Guanhua, LI Yanzhong*

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

Abstract: During the ice-laying period, a phenomenon is observed that the ice crystal could not be maintained in the filling tube, which results in the direct connection between the capsule and the deuterium source at high temperature. In this paper, a 3D cryogenic target model was established to study the influence of several factors on the temperature along capsule surface and filling tube. The results show that changing the transmittance of the sealing film can effectively solve the problem of being unable to block the filling tube, while changing the shield temperature and the surface emissivity of the aluminum enclosure has no obvious effect on that problem. It is found that the

收稿日期:2019-10-24;修回日期:2019-12-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51506158)

作者简介:郭富城(1995—),男,河北邯郸人,博士研究生,从事低温冷冻靶温度场模拟研究

*通信作者:厉彦忠, E-mail: yzli-epe@mail. xjtu. edu. cn

网络出版时间:2020-04-30;网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20200430.0904.004.html>

crystal can be maintained in the filling tube under the boundary conditions discussed in this paper with the transmittance of the sealing film greater than 0.025.

Key words: inertial confinement fusion; numerical simulation; radiation; temperature characteristic

近年来,煤、石油及天然气等化石能源消耗巨大,能源危机及环境问题日益严峻^[1-5]。为寻求一种高效清洁的能源形式,惯性约束核聚变(ICF)的概念应运而生^[6-7]。ICF是指依靠热核燃料和推进层剩余质量的惯性对高温高密度的热核燃料进行约束,使其实现热核聚变,从而获取聚变能的方法^[8]。目前国外ICF装置主要有美国国家点火装置和法国兆焦耳激光装置^[9-10],国内ICF装置为中国工程物理研究院激光聚变研究中心的SG-III装置^[11-13]。ICF装置的主要部件为置于冷冻靶系统中心的球形靶丸,为实现点火要求,靶丸内燃料冰层均匀性需大于99%,表面均方根粗糙度需小于 $1\ \mu\text{m}$ ^[14-16],冰层低模粗糙度主要受冷冻靶温度场所决定。

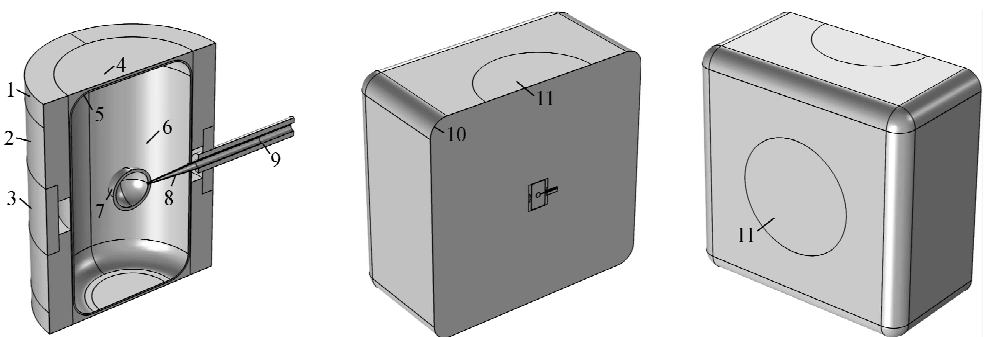
在冷冻靶靶丸冰层制备阶段,需先通过充气管对靶丸进行燃料加注,然后迅速降温,使氘燃料气在靶丸及充气管内迅速固化结晶。之后缓慢抬升上下硅臂温度,使靶丸内的燃料冰层逐渐融化,同时需确保靶丸与充气管连接处的冰晶不会消失。靶丸与充气管连接处的冰晶作用主要有:1)作为冰层生长的籽晶,用以满足冰层的单晶制备需求,保证冰层质量;2)将靶内空间同充气管外侧高温气源隔绝,避免外界

高温燃料气体侵入靶丸内部影响冰层质量^[17]。然而,在SG-III实验过程中发现,缓慢抬升上下硅臂温度时,靶丸与充气管连接处的燃料冰先融化,即其局部温度较高,使得靶丸内部空间与外侧高温气源直接连通,靶丸内冰层质量恶化。为此,本文研究辐射条件下,不同屏蔽罩温度、封口膜透射率及铝套筒表面发射率对靶丸表面及充气管沿程温度分布的影响,以解决实验中的不能堵管问题。

1 物理模型与数值方法

1.1 物理模型

冷冻靶柱腔物理模型如图1所示。冷冻靶尺寸参考美国国家点火装置^[18],CH靶丸外径为0.84 mm,靶壳厚度为0.06 mm;靶丸内无冰层,靶丸内及充气管内填充1 kPa氘气;石英充气管壁厚为0.01 mm,充气管入口处内径为0.17 mm,出口处内径为0.04 mm;铝制转接管内径为0.20 mm,壁厚为0.10 mm;金腔内径为2.60 mm,壁厚为0.03 mm;金腔外壁通过4个截面为 $0.02\ \text{mm} \times 0.02\ \text{mm}$ 的金制凸环(图中未标出)与铝套筒内壁连接;铝套筒高度为4.84 mm,内径为2.70 mm,壁厚为0.50 mm;铝制屏蔽罩尺寸为 $40\ \text{mm} \times 40\ \text{mm} \times 40\ \text{mm}$,



1——硅臂接触环面;2——铝套筒;3——诊断环;4——激光入射口封口膜;

5——金腔;6——氘气腔;7——靶丸外壳;8——充气管;9——转接管;

10——低温屏蔽罩(内置冷冻靶装置);11——屏蔽罩窗口膜(低温屏蔽罩上下、前后设有4个)

图1 冷冻靶装置物理模型

Fig.1 Physical model for cryogenic target

屏蔽罩窗口膜直径为 20 mm。铝套筒与诊断环间、诊断环与转接管间、转接管与充气管间填充有 0.03 mm 低温胶,充气管与金腔间填充有 0.1 mm 低温胶。

1.2 数值方法

由于冷冻靶模型沿竖直平面对称,故仅对半个模型剖分计算网格。采用 ANSYS Gambit 软件对冷冻靶柱腔模型进行网格剖分,并进行网格无关性验证,以确保计算结果的准确性。以靶丸表面最大温差作为表征参数,分别对 180 万、340 万、560 万和 990 万网格数进行计算,网格无关性验证结果如图 2 所示,最终计算采用网格数为 340 万的模型进行研究。

采用 ANSYS Fluent 15.0 进行模拟计算。定义典型工况如下:屏蔽罩外为 300 K 常温环境,屏蔽罩温度为 30 K,屏蔽罩发射率为 1,屏蔽罩窗口膜透射率为 1,罩内为真空环境;上下冷臂温度为 18 K;南北两极封口膜透射率为 0.001;铝套筒壁面发射率为 0.5,金腔表面发射率为 0.02;氦气腔内氦气压力为 1 kPa;充气

管及转接管表面发射率为 0.5;靶丸考虑为理想黑体,靶丸内及充气管内填充 1 kPa 氦气。

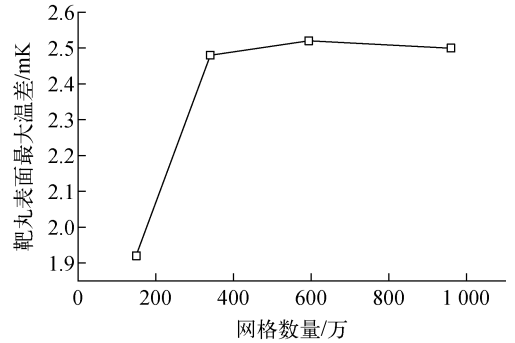


图 2 网格无关性验证结果

Fig. 2 Grid-independent validation result

由于氦气腔内部温差较小,故采用 Boussinesq 近似模拟腔内氦气的自然对流;为处理半透明介质的透射问题,需采用离散坐标法(DO)模拟冷冻靶系统中的辐射工况。计算中所使用的材料物性参数列于表 1。

表 1 不同材料在 18 K 环境下的物性参数

Table 1 Physical properties of different materials at 18 K

材料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	热容 $c_p/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	导热系数 $\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	动力黏度 $\mu/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
铝	2 710	8.37	27	
金	19 320	14.66	1 173.44	
低温胶	2 719	79.41	0.022	
石英	2 664.2	43.32	0.31	
CH	1 100	57.49	0.057	
He@1 kPa	0.3	5 292.6	0.021	1.31×10^{-6}
D ₂ @1 kPa	0.025	5 193.7	0.024	3.42×10^{-6}

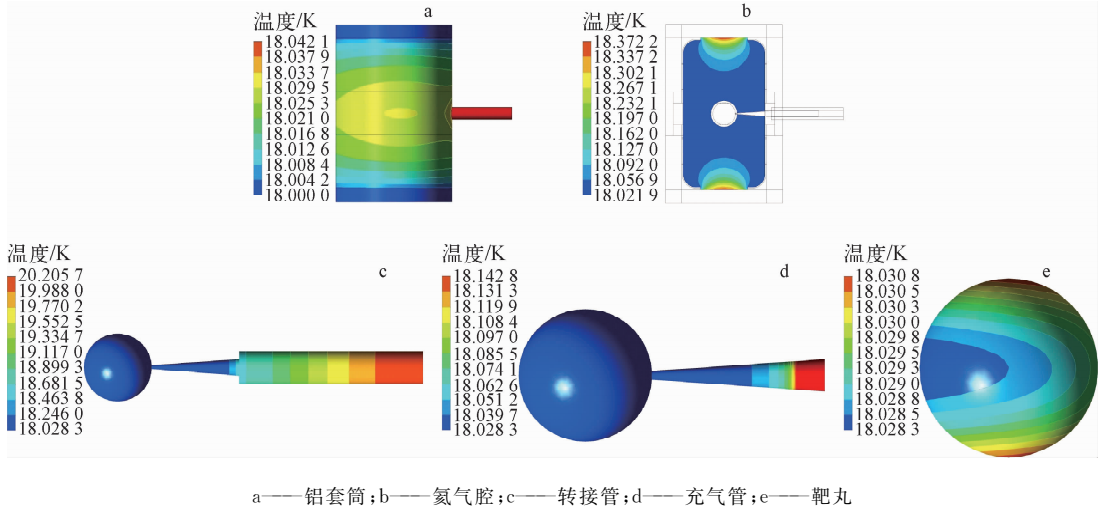
2 典型工况分析

首先对典型工况下冷冻靶铝套筒、氦气腔及靶丸温度云图进行分析,探究柱腔内关键部件的温度分布基本规律,结果如图 3 所示。

从图 3a 可看出,由于辐射的影响,诊断环表面温度高于铝套筒,且越靠近赤道处诊断环温度越高。铝套筒和诊断环表面温度云图关于赤道对称,但由于转接管的存在,铝套筒及诊断环周向温度分布并不对称,越靠近转接管温度越高,同一周线上温度最低点在充气管位置对侧,这是因为转接管同诊断环之间涂有低温胶

层,转接管所受到的辐射热流无法有效传递到上下冷臂,从而使得转接管温度较高。

从图 3b 可看出,氦气腔内温度云图关于赤道也基本对称,温度最高点出现在南北两激光入射口,这两处的热量来源主要是外界辐射热,辐射热量在向腔内传递的过程中不断被氦气等介质带走,因此云图上腔内大部分处于低温区域。另外,在氦气腔温度云图中并未发现充气管处有明显温度变化,说明转接管的热量被诊断环、氦气和金腔有效传递至冷臂,没有大量传入腔内造成局部高温。



a——铝套筒;b——氦气腔;c——转接管;d——充气管;e——靶丸

图3 冷冻靶温度云图

Fig. 3 Temperature contour of cryogenic target

从图 3c、d 可看出,转接管沿程温度变化较为剧烈,而充气管沿程温度变化较为平缓,说明有较多的热量通过诊断环和氦气等传递至冷臂,仅有较少的热量通过充气管传递至靶丸。

从图 3e 可看出,靶丸表面温度云图基本呈南北两极高、赤道低的分布形式,南北两极处由于直接受到外界辐射从而出现局部高温,赤道处于金腔的传热距离最短位置从而出现局部低温。靶丸右侧连接充气管,充气管会携带一部分热量进入靶丸从而抬升靶丸与充气管接触处的温度。靶丸与充气管连接处温度较高,会使得均化过程中充气管内冰核难以维持,从而导致靶丸内与外界气源直接相连,造成堵管困难。

3 结果分析与讨论

本文通过模拟不同辐射工况下,冷冻靶靶丸表面(简称靶表)及充气管沿程温度分布变化规律,以解决实验中遇到的充气管难以堵管的问题。

3.1 屏蔽罩温度对靶表及充气管沿程温度分布的影响

分别模拟了屏蔽罩温度为 30、60、90、120 K 4 种工况下靶表及充气管沿程温度分布形式,其余边界条件同典型工况。不同屏蔽罩温度下靶丸南北两极平面温度、充气管沿程及靶丸赤道平面温度示于图 4。需要说明的是,图 4a 中 0° 为靶丸与充气管连接处, 90° 为靶丸北

极点, 270° 为靶丸南极点;图 4b 中沿程距离的原点为靶丸中心点,规定沿充气管方向为正向,靶丸所在区域为 $-0.42 \sim 0.42$ mm,金腔与充气管耦合处所在区域为 $1.30 \sim 1.33$ mm。

从图 4a 可看出,靶丸南北两极平面温度呈南北两极高、赤道处低的分布趋势,随着屏蔽罩温度的上升,靶丸南北两极平面平均温度整体基本呈线性增长;由于受充气管导热作用,靶丸与充气管连接处温度较高。从图 4b 可看出,受屏蔽罩温度的影响,充气管末端温度有明显差异,且充气管末端温度与屏蔽罩温度基本呈线性关系,屏蔽罩温度每上升 30 K,充气管末端温度上升约 1 K;在沿程距离 $1.30 \sim 1.51$ mm 处充气管与金腔接触,外界的热量通过充气管传递至靶丸的过程中被金腔吸收,不同屏蔽罩温度工况下充气管与金腔的接触位置温度差异较小;在沿程距离 $0.42 \sim 1.30$ mm 范围内,充气管仅与腔内氦气接触换热,冷却作用较弱,充气管沿程温度未发生明显变化;沿程距离 $-0.42 \sim 0.42$ mm 为靶丸赤道平面温度,图中对该区间温度分布曲线进行局部放大,可发现,不同屏蔽罩温度下靶丸赤道平面温度分布趋势基本一致,均为靠近充气管侧温度较高,远离充气管侧温度较低,随着屏蔽罩温度的上升,靶丸赤道平面平均温度及温差呈线性递增,如图 5 所示,屏蔽罩温度上升 30 K,靶丸赤道平面平均温度上升约 0.044 K,靶丸赤道平面最大温差上升约 1.93 mK。屏蔽罩温度的提高

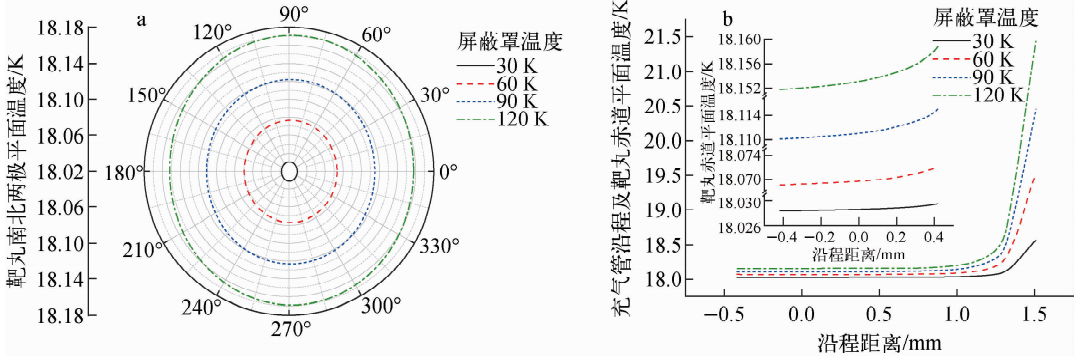


图 4 不同屏蔽罩温度下靶丸南北两极平面温度和充气管沿程及靶丸赤道平面温度
Fig. 4 Temperatures of epipolar plane and capsule and filling tube in equatorial plane under different shielding-temperature conditions

会使得靶丸赤道平面温差增大,充气管内的晶核更难以维持,无法堵管。

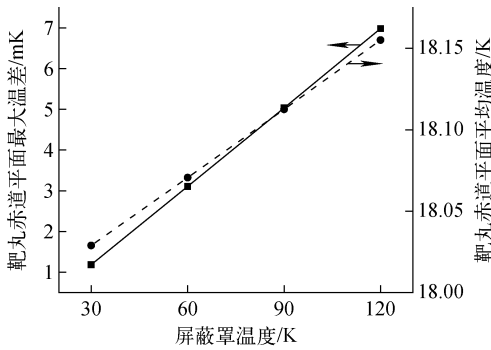


图 5 不同屏蔽罩温度下靶丸赤道平面温差及平均温度

Fig. 5 Temperature-difference and average-temperature of capsule in equatorial plane under different shielding-temperature conditions

3.2 封口膜透射率对靶表及充气管沿程温度分布的影响

对于腔内靶丸,其所受到的热负荷一部分来自于充气管导热,绝大部分热量来自于南北

两极封口膜所透射的外界辐射,鉴于此,需分析讨论不同封口膜透射率对靶表及充气管沿程温度分布的影响。本文模拟了封口膜透射率分别为 0.001、0.01 和 0.1 等 3 种工况,其余边界条件同典型工况,如图 6、7 所示。

从图 6 可看出,封口膜透射率为 0.001 和 0.01 工况下靶表温度分布形式基本一致,均是南北两极温度较高,充气管对侧赤道处温度最低,但随着封口膜透射率的增大,靶表低温区域移至靶丸与充气管连接处,充气管对侧不再是温度最低的区域。为进一步分析靶表温度分布特性,研究了不同封口膜透射率下靶丸南北两极平面温度、充气管沿程及靶丸赤道平面温度,如图 7 所示。

从图 7a 可看出,随着封口膜透射率的增大,靶丸南北两极平面平均温度明显增大,且 3 种工况下均呈南北两极温度高、赤道处温度低的分布趋势。从图 7b 可发现,不同封口膜透射率工况下,沿程距离为 1.5 mm 的充气管外端温度基本一致,说明充气管外端温度主要受铝套筒及金腔温度控制,腔内辐射条件对充气管

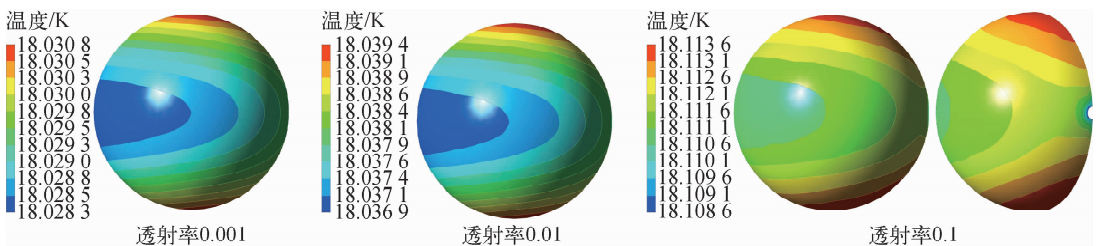


图 6 不同封口膜透射率下靶表温度云图

Fig. 6 Temperature contour of cryogenic target under different sealing-film-transmittance conditions

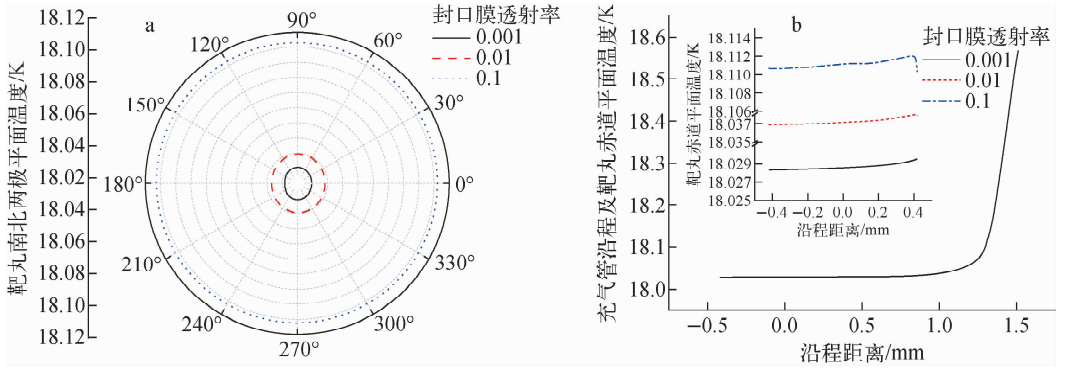


图7 不同封口膜透射率下靶丸南北两极平面温度和充气管沿程及靶丸赤道平面温度
Fig. 7 Temperatures of epipolar plane and capsule and filling tube in equatorial plane under different sealing-film-transmittance conditions

外端温度的影响可忽略不计;随着沿程距离逐渐减小,充气管受到的通过封口膜透射的辐射热量作用增强,具体表现为封口膜透射率越大,充气管沿程温度越高;封口膜透射率达到0.1时,充气管与靶丸连接处的温度已明显高于充气管与金腔接触处的温度(沿程距离 ~ 1.3 mm)。不同透射率条件下靶丸赤道平面温度分布也表现出不同的规律:当封口膜透射率为0.001和0.01时,靶丸赤道平面温度在靶丸与充气管连接处较高、对侧较低;当封口膜透射率增至0.1时,靶丸赤道平面温度分布趋势基本不变,但在靶丸与充气管连接处温度明显下降,即靶丸接收到大量辐射热,其温度已超过充气管与金腔接触处(沿程距离 ~ 1.3 mm),受充气管的导热作用,靶丸与充气管连接处温度明显下降,从而造成堵管。

为进一步探究可堵管的临界封口膜透射率,分别研究了封口膜透射率为0.05和0.025两种工况下充气管沿程及靶丸赤道平面温度,如图8所示。

从图8可看出,封口膜透射率为0.025时,靶丸与充气管连接处温度基本与靶丸和充气管连接处对侧温度相同,此时封口膜透射率为维持堵管的临界透射率。

3.3 铝套筒表面发射率对靶表及充气管沿程温度分布的影响

分别模拟了铝套筒发射率为0.1、0.5、1.0等3种工况下靶表及充气管沿程温度分布形式,其余边界条件同典型工况,结果如图9所示。

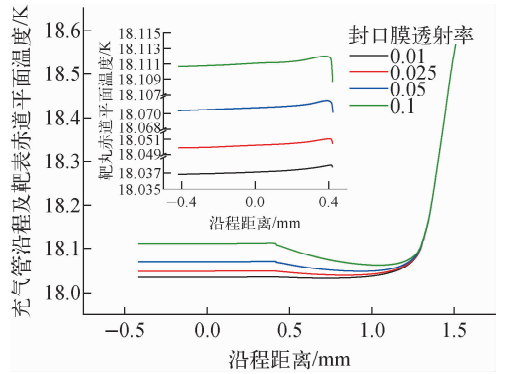


图8 不同封口膜透射率下充气管沿程及靶表赤道平面温度
Fig. 8 Temperature of capsule and filling tube in equatorial plane under different sealing-film-transmittance conditions

从图9a可看出,在不同铝套筒表面发射率工况下,靶丸南北两极温度分布均呈南北两极高、赤道低的趋势,随着铝套筒表面发射率增大,靶丸表面平均温度升高。从图9b分析得到,充气管外端(沿程距离1.5 mm)温度随铝套筒表面发射率的增大而增大,这是由于铝套筒表面发射率较大时,铝套筒所吸收的辐射热量较多,铝套筒表面温度升高,充气管外端温度也随之升高;随着沿程距离的缩减,3种工况下充气管沿程温度均按照相同的趋势递减;不同铝套筒表面发射率工况下靶丸赤道平面温度分布趋势基本相同,靶丸与充气管连接处温度均较高,这会造成在冰层均化过程中充气管中的冰核难以维持,无法堵管。

图10为不同铝套筒表面发射率下靶丸赤

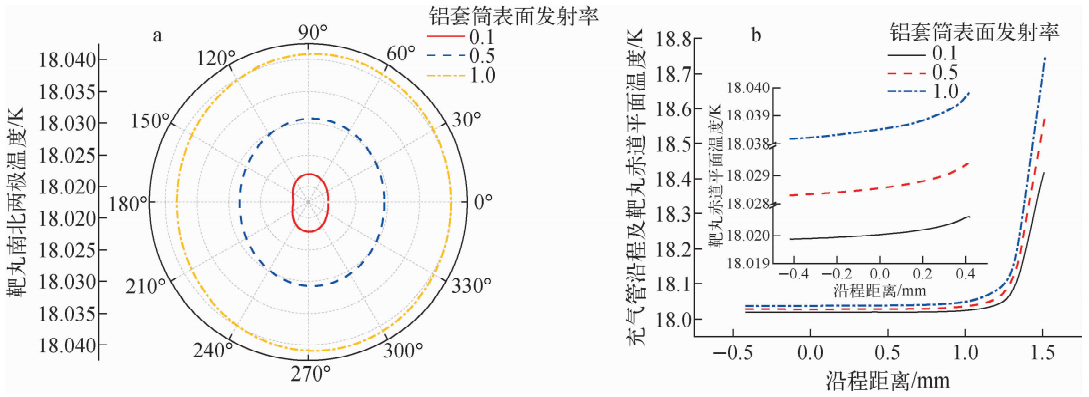


图9 不同铝套筒表面发射率下靶丸南北两极温度和充气管沿程及靶丸赤道平面温度
Fig. 9 Temperatures of epipolar plane and capsule and filling tube in equatorial plane under different Al-enclosure-emissivity conditions

道平面最大温差及平均温度。可看出,靶丸赤道平面平均温度和最大温差均随铝套筒表面发射率基本呈线性变化,铝套筒表面发射率提升0.1,靶丸赤道平面平均温度增大约2.08 mK,靶丸赤道平面最大温差增大约0.10 mK。

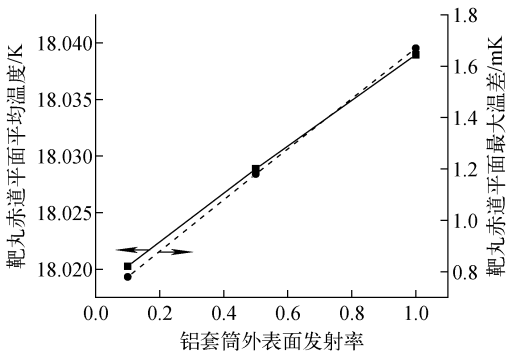


图10 不同铝套筒表面发射率下靶丸赤道平面平均温度及最大温差

Fig. 10 Average-temperature and temperature-difference of capsule in equatorial plane under different Al-enclosure-emissivity conditions

4 结论

本文以实验中遇到的充气管晶核无法堵管问题为背景,研究分析了辐射条件下,屏蔽罩温度、封口膜透射率及铝套筒表面发射率3种因素对靶表及充气管沿程温度特性的影响规律,得到以下结论。

1) 靶丸赤道平面平均温度及最大温差同屏蔽罩温度基本呈线性变化,屏蔽罩温度上升30 K,靶丸赤道平面平均温度上升约0.044 K,

靶丸赤道平面最大温差上升约1.93 mK;由于靶丸与充气管连接处温度较高,晶核仍难以持续维持,无法堵管。在实验中,为尽可能提升靶表温度均匀性,可适当降低屏蔽罩温度,使得屏蔽罩温度接近靶丸平均温度。

2) 改变封口膜透射率可有效解决无法堵管的问题,经过研究发现,在本文讨论的边界条件下,封口膜透射率大于0.025时靶丸与充气管连接处温度相对较低,晶核可维持,充气管能堵管。因此可根据实验工况计算出满足堵管要求的临界封口膜透射率,采用略高于临界透射率的封口膜,以在不过分破坏靶表温度均匀性的前提下满足堵管需求。

3) 靶丸赤道平面平均温度及最大温差同铝套筒表面发射率基本呈线性变化,铝套筒外表面发射率提升0.1,靶丸赤道平面平均温度增大约2.08 mK,靶丸赤道平面最大温差增大约0.10 mK;由于靶丸与充气管连接处温度较高,晶核仍难以持续维持,无法堵管。制靶时可通过降低铝套筒外表面发射率,如对铝套筒外表面进行抛光处理来降低靶表温差,提升靶表温度均匀性。

参考文献:

- [1] 柴磊,钟敏. 钙钛矿太阳能电池近期进展[J]. 物理学报,2016,65(23):12-26.
CHAI Lei, ZHONG Min. Recent research progress in perovskite solar cells[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(23): 12-26(in Chinese).
- [2] HORVATH A, RACHLEW E. Nuclear power

- in the 21st century: Challenges and possibilities [J]. *Ambio*, 2016, 45: 38-49.
- [3] CLARK D S, MARINAK M M, WEBER C R, et al. Radiation hydrodynamics modeling of the highest compression inertial confinement fusion ignition experiment from the National Ignition Campaign[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22: 022703.
- [4] LINDL J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. *Physics of Plasmas*, 1995, 2(11): 3 933-4 024.
- [5] HUO W Y, LI Z, CHEN Y H, et al. First investigation on the radiation field of the spherical hohlraum[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(2): 025002.
- [6] MOLL G, CHARTON S. Update on thermal and hydrodynamic simulations on LMJ cryogenic targets [J]. *Fusion Science and Technology*, 2004, 45(2): 233-244.
- [7] MOLL G, MARTIN M, COLLIER R. Thermal simulations of the intermediate step laser Mega-joule cryogenic target (parametric study) [J]. *Fusion Science and Technology*, 2009, 55(3): 283-289.
- [8] BEL'KOV S A, ABZAEV F M, BESSARAB A V, et al. Compression and heating of indirectly driven spherical fusion targets on the ISKRA-5 facility[J]. *Laser and Particle Beams*, 1999, 17(4): 591-596.
- [9] 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): 052704.
- [10] HARDING D R, ULREICH J, WITTMAN M D, et al. Requirements and capabilities for fielding cryogenic DT-containing fill-tube targets for direct-drive experiments on OMEGA[J]. *Fusion Science and Technology*, 2018, 73(3): 1-11.
- [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 (in Chinese).
- [12] 王凯, 谢端, 林伟, 等. ICF 冷冻靶燃料冰层原位表征技术[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3 230-3 234.
- WANG Kai, XIE Duan, LIN Wei, et al. In situ characterization technique of fuel ice layer for ICF cryotargets[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3 230-3 234 (in Chinese).
- [13] 林伟, 王凯, 毕鹏, 等. ICF 冷冻靶微管充气过程中气体压力测量[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(10): 2 343-2 346.
- LIN Wei, WANG Kai, BI Peng, et al. Gas pressure measurement in ICF cryogenic target micro-tube gas-filling process[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(10): 2 343-2 346 (in Chinese).
- [14] 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.
- [15] 殷阁媛, 厉彦忠, 郑江. 冷冻靶封装套中辅助热流密度的优化[J]. *原子能科学技术*, 2016, 50(4): 627-634.
- YIN Geyuan, LI Yanzhong, ZHENG Jiang. Optimization of auxiliary heat flux in thermo-mechanical package of cryogenic target[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2016, 50(4): 627-634 (in Chinese).
- [16] 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.
- [17] KOZIOZIEMSKI B J, MAPOLES E R, SATER J D, et al. Deuterium-tritium fuel layer formation for the national ignition facility[J]. *Fusion Science and Technology*, 2011, 59(1): 14-25.
- [18] PHILLION D W, POLLAINÉ S M. Dynamical compensation of irradiation nonuniformities in a spherical hohlraum illuminated with tetrahedral symmetry by laser beams[J]. *Physics of Plasmas*, 1994, 1(9): 2 963-2 975.