

冷冻靶温度场瞬态响应特性及二级冷屏影响分析

傅智莹, 李翠, 李黎, 阴实开, 厉彦忠

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对屏蔽结构开启过程中, 外界大量辐射热的传入导致的冷冻靶燃料冰层均匀性恶化问题, 建立了带低温屏蔽罩和二级冷屏结构的六端直柱腔冷冻靶三维模型, 基于 Boussinesq 假设和离散坐标(DO)辐射模型, 利用 FLUENT 软件进行数值模拟, 探究了屏蔽结构开启过程靶丸表面温度场的瞬态响应规律, 研究了二级冷屏结构及其位置对瞬态温度特性的影响。结果表明: 低温屏蔽罩开启过程中, 在外界辐射、黑腔内气体对流及充气管导热等因素的综合影响下, 靶丸表面温度快速上升, 靶丸表面最大温差则先迅速上升至峰值而后下降并趋于稳定; 二级冷屏结构能有效阻挡外界高温辐射, 使靶丸表面最高温度的温升降低了 39.5%, 靶丸表面温度均匀性改善了 39%; 缩小二级冷屏上下侧壁面的窗口或增大上下侧壁面与靶丸中心的距离, 可以进一步降低靶丸表面温升、改善温度均匀性恶化程度; 靶丸表面温度对二级冷屏前端上、下侧壁面位置变化的敏感程度远大于其他侧壁面。所得结果对屏蔽结构开启过程中靶丸表面温度场的控制具有指导意义。

关键词: 冷冻靶; 瞬态响应; 热屏蔽结构; 数值模拟

中图分类号: TB661 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202308007 **文章编号:** 0253-987X(2023)08-0066-10

Transient Temperature Characteristics of Cryogenic Target and Analysis on Influence of Fixed Thermal Shields

FU Zhiying, LI Cui, LI Li, YIN Shikai, LI Yanzhong

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

Abstract: When the cryogenic thermal shield is removed, the fuel ice uniformity of cryogenic target deteriorates significantly due to the introduction of a large amount of radiant heat from the ambient environment. For this problem, a three-dimensional model was established for a six-entrance cylinder-hohlraum cryogenic target with removable and fixed thermal shields based on the Boussinesq hypothesis and the discrete coordinate (DO) radiation model in the present study. The FLUENT software is used for numerical simulation to investigate transient temperature characteristics of the capsule surface during the thermal shield removal process, and analyze the influence of the structure and position of the fixed thermal shield on these transient temperature characteristics. The results show that during the removal of the cryogenic thermal shield, the temperature of the capsule surface increases rapidly under the combined effect of the external radiation, the convection in the hohlraum and the conduction through the fill tube, while the maximum temperature difference on the capsule surface first increases rapidly to the peak, then de-

creases, and finally tends to be stable. The fixed thermal shield structure can effectively prevent the external high-temperature radiation, reducing the temperature rise in the maximum temperature on the capsule surface by 39.5% and improving the uniformity of capsule surface temperature by 39%. Reducing the size of windows in the upper and lower side walls or increasing the distances from the walls to the capsule center can further reduce the temperature rise of the maximum temperature on the capsule surface and suppress the deterioration of temperature uniformity. The sensitivity of capsule surface temperature to the change in positions of the front upper and lower side walls of the fixed thermal shield is higher than that of other side walls. The results are instructive for the capsule surface temperature control during cryogenic thermal shield removal.

Keywords: cryogenic target; transient characteristics; thermal shield; numerical simulation

聚变能作为一种丰富、清洁、高效的新能源而备受关注。目前,惯性约束核聚变(ICF)是最有希望实现可控核聚变的一种方法^[1-2]。在国际上,进行ICF实验研究的装置有美国国家点火装置(NIF)^[3-6]、法国兆焦激光装置(LMJ)^[7]和中国神光Ⅲ激光装置等^[8]。在2021年8月,NIF实现了1.3 MJ创纪录的聚变放能,但能量增益仅为0.72^[9]。而在2022年12月,NIF点火成功,输入2.05 MJ能量,产出3.15 MJ聚变能,能量增益超过了1,得到了跨越式的突破^[10]。冷冻靶是当前世界上实现ICF点火目标的首选靶型^[11]。ICF通常采用的是间接点火方式^[12],即利用驱动器产生的高能激光通过激光入射口(LEH)射入黑腔内,黑腔壁面吸收并转化成X射线,加热黑腔内靶丸的核聚变燃料,形成高温等离子体,进而使靶丸内爆,并实现核聚变反应。要使内爆过程能顺利进行,需要氘氚(DT)冰层足够均匀光滑来减轻由于流体动力学不稳定性(瑞利-泰勒不稳定性)所带来的影响^[13-14]。

为了实现ICF的成功点火,DT冰层必须均匀度大于99%,其表面粗糙度小于 $1\text{ }\mu\text{m}$ ^[15-16]。而获得高质量DT冰层的关键是控制靶丸表面的最大温差,当靶丸表面温度足够均匀时,才能获得均匀的DT冰层^[17]。在制靶过程中,为提升燃料品质,通常使用常温屏蔽罩、低温屏蔽罩、硅臂屏蔽片和二级冷屏等多重屏蔽结构来削弱外界高温辐射对冷冻靶靶丸表面温度均匀性的影响^[18]。低温屏蔽罩可以为冷冻靶提供相对均匀的低温环境,防止激光入射口处发生冷凝以及减少外界环境辐射对靶丸温度均匀性的影响,从而改善燃料冰层质量^[19-20]。而打靶时,低温屏蔽罩需要被稳定的完全移除,以便于激光能够准确的投射至靶丸^[21]。移除低温屏蔽罩会使冷冻靶完全暴露在外界环境中,随着外部辐射的大量进入,冷冻靶温度场受到强烈扰动,冰层质量严重下降,届时冰层质量将不足以实现对称内爆,造成点

火失败^[22]。研究表明,为在屏蔽罩开启后顺利打靶,靶丸外表面最高温度在屏蔽罩开启过程中升高值应小于 0.25 K ^[23]。二级冷屏作为一种固定式的热屏蔽结构,在制靶时,可以为冷冻靶提供更均匀的低温环境,且在屏蔽罩开启过程中,可以起到阻挡外界大量高温辐射,减少外界辐射影响的作用,但国内外学者对此相关研究鲜有报道。

本文通过建立带低温屏蔽罩、二级冷屏和充气管结构的六端直柱腔全冷链冷冻靶三维模型,旨在探究低温屏蔽罩开启过程中,靶丸表面温度场的瞬态特性和二级冷屏结构及位置对瞬态温度特性的影响规律,为工程设计和物理实验提供理论指导。

1 数值模拟方法

1.1 物理模型

本文选取建立的物理模型为六端直柱腔冷冻靶,其前端结构参考俄罗斯六孔注入冷冻靶模型^[24]。两者主要区别为前者黑腔结构为6个直圆柱型,而后者为6个圆锥型。全冷链模型图如图1所示,包括前端冷冻靶结构、支撑结构和热屏蔽结构3部分。冷冻靶的主要结构包括套筒(TMP)、镀金黑腔、靶丸、充气管、6个激光入射口(LEH)和诊断环等;支撑结构包括硅臂和导冷杆等;热屏蔽结构包括二级冷屏和低温屏蔽罩等。靶丸处于黑腔正中心位置,外表面直径为 0.87 mm ,由表及里依次为厚度 0.06 mm 的烧蚀层(GDP)、厚度 0.03 mm 的DT冰层和直径为 0.69 mm 的DT气体共3部分。与靶丸直接相连结构为充气管(材料为石英),其作用是向靶丸内充注燃料气体和支撑靶丸。充气管与靶丸相接处管径为 0.013 mm ,管壁厚度为 $2\text{ }\mu\text{m}$,与套筒接触处管径为 0.192 mm ,管壁厚度为 $1\text{ }\mu\text{m}$,充气管与套筒间填充 $25\text{ }\mu\text{m}$ 厚度的低温胶层。

规定如下: y 轴上的靶丸外表面位置为南北两极; xy 平面上的靶丸表面各点所组成的曲线为竖直

特征线; xz 平面上的靶丸表面各点所组成的曲线为

赤道特征线。

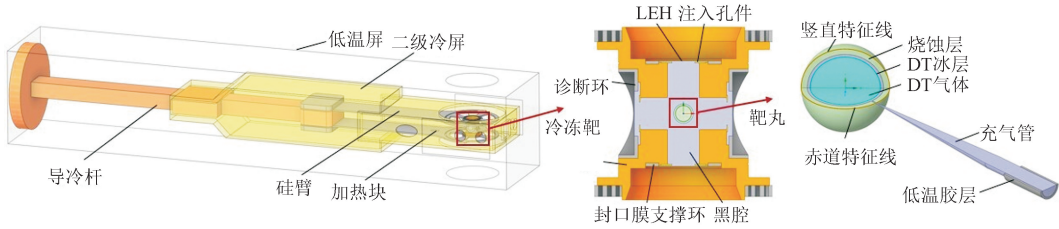


图 1 冷冻靶模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cryogenic target model

二级冷屏具体结构如图 2 所示,其材料为高纯无氧铜,其后端底部固定在导冷杆上,接触位置处有一定厚度的铜片。二级冷屏的前端部分上下侧壁面上的圆窗半径 R 为 4~14 mm,二级冷屏前端的各个壁面位置及其厚度如表 1 所示。当 $R=11$ mm、 $L=5.2$ mm、 $M=14.4$ mm、 $N=14.5$ mm 为二级冷屏的基准位置,在基准位置下,对二级冷屏各侧壁面进行平移,研究二级冷屏结构位置所带来的影响,以远离靶丸中心点平移方向为正方向。在对一个方向的壁面进行平移时,固定其他壁面的位置,同时保持每个壁面的厚度不变。上述物理模型中所用到的不同材料的物性参数如表 2 所示。

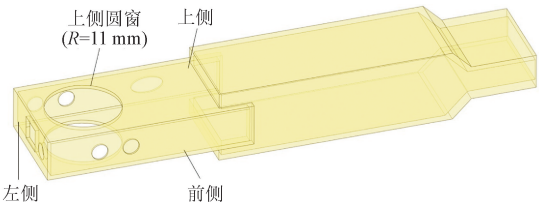


图 2 二级冷屏结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fixed thermal shield

表 1 二级冷屏前端各壁面尺寸参数

Table 1 Size parameters of fixed thermal shield

壁面	内壁面距靶丸中心垂直距离/mm	厚度/mm
上、下侧	$L=4.2\sim9.2$	1.00
左侧	$M=12.4\sim18.4$	1.12
前、后侧	$N=13.5\sim18.5$	0.50

表 2 主要材料的物性参数(18 K)

Table 2 Physical properties of main material(18 K)

材料	密度 $/(kg\cdot m^{-3})$	比热容 $/(J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1})$	导热系数 $/(W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1})$
铜	9 028	5.160 53	777.401 00
单晶硅	2 330	3.790 00	1 377.000 00
石英	2 664	43.320 00	0.310 00
低温胶	1 200	68.140 00	0.032 00
氦气	1	5 214.300 00	0.026 11

1.2 数值方法

利用基于有限容积法的 ANSYS Fluent 2021 R1 软件进行数值模拟计算。因 LEH 封口膜及低温屏蔽罩上所开的方形窗口和圆形窗口均为半透明介质,故在模拟中采用离散坐标(DO)辐射模型^[25]。黑腔内的气体流动为自然对流,且气体密度和温度变化小,故使用 Boussinesq 假设,采用层流流动模型^[26]。针对该瞬态数值模型,文献[27]采用平面靶装置实验数据进行了实验验证,模拟计算得到的靶丸温度数据与实验所测结果相吻合,且相对误差小于 10%,表明模型能较好预测靶丸的温度分布。由于全冷链的结构尺寸跨度大,为提升网格质量、降低网格数量,利用 Shell Conduction 处理精细结构如充气管管壁的壳热传导问题(兼顾径向和轴向的热传导)^[28]。

低温屏蔽罩开启前的稳态工况边界条件如下:低温屏温度为 120 K,低温屏上的方窗和圆窗透射率为 0.75,外界辐射温度为 300 K;6 个 LEH 封口膜透射率均为 0.06;二级冷屏上窗口均为全透;导冷杆底部温度为 15 K 恒温,硅臂上加热块恒温 18.6 K;硅臂的表面发射率为 0.6,套筒的表面发射率为 0.05,硅臂与套筒间有厚度为 15 μ m 低温胶层;黑腔内填充 40 kPa 氦气;靶丸外表面发射率为 0.9,因 DT 气体与 DT 冰层存在 β 衰变热,分别给定内热源为 50,50 000 $W\cdot m^{-3}$ 。低温屏蔽罩开启后,冷冻靶暴露在外界环境的辐射中(环境温度为 300 K),在模拟低温屏蔽罩开启后的瞬态换热过程时,以低温屏蔽罩开启前的稳态工况作为初始时刻条件,将低温屏边界改变为外部辐射系数为 1,外界辐射温度为 300 K,维持其他边界条件不变。瞬态计算时的时间步长为 0.003 s。

为评价二级冷屏各侧壁面在不同方向平移对最高温度的温升和靶丸表面温度均匀度的影响程度,引入温升敏感系数 $\epsilon_{T_{max}}$ 与温度均匀系数 $\epsilon_{\Delta T_{max}}$

$$\epsilon_{T_{\max}} = \frac{\sum |T_{i,\max} - T_{0,\max}|}{\sum |x_i - x_0|} \quad (1)$$
$$\epsilon_{\Delta T_{\max}} = \frac{\sum |\Delta T_{i,\max} - \Delta T_{0,\max}|}{\sum |x_i - x_0|} \quad (2)$$

式中： x_i 为平移距离； $T_{i,\max}$ 为平移距离 x_i 时靶丸表面最高温度的温升； $\Delta T_{i,\max}$ 为平移距离 x_i 时靶丸表面最大温差的峰值。

1.3 网格无关性验证

采用 ANSYS Fluent Meshing 软件对六端直柱腔冷冻靶模型进行网格划分,靶丸到屏蔽罩的尺寸跨度比较大,设置的网格尺寸最小为 0.001 mm,最大为 1.6 mm,增长率为 1.2,由里到外平滑过渡,靶丸与充气管等结构及狭小区域面进行局部尺寸设置并加密。在屏蔽罩开启前的稳态工况下,对网格数从 207 万到 392 万进行计算,结果如图 3 所示,当网格数大于 270 万时,靶丸表面最高温度和最低温度趋于稳定。网格数量过小将会带来较大误差,数量过大会增加计算量,因此本文采用的网格数量为 321 万。

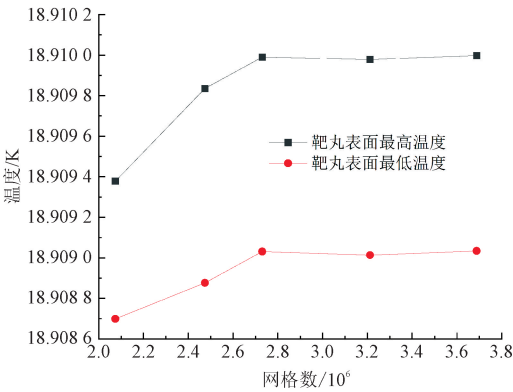


图 3 网格无关性验证
Fig. 3 Grid-independence verification

2 结果讨论与分析

2.1 温度场瞬态响应特性分析

2.1.1 冷冻靶温度场分布

靶丸表面温度图如图 4 所示,屏蔽罩开启前,不同 LEH 位置的入射辐射强度如图 5 所示。由图 4(a)可知,靶丸表面最高温度为 18.910 05 K,最低温度为 18.909 08 K,最大温差为 0.97 mK;由图 4、图 5 可知,靶丸表面最高温度在南北极点附近,是因为外界辐射通过 LEH(如图 1 所示)进入黑腔内,且上、下侧 LEH 的入射辐射强度大于其他侧,靶丸南北极所接收的辐射量最大。充气管的导热系数大于氦气的导热系数,

传热效果更好,所以温度最低点出现在充气管与靶丸接触位置处。靶丸右侧(特征线 0°位置附近)通过 LEH 正对的是温度较低的导冷杆,接收的辐射量较小,故温度较低。在两条特征线上极坐标角度为 45°、135°、225°、315°的 4 个点附近温度较低,是因为接收外界的辐射量较少,并且离套筒内壁面的距离最近,在初始时刻,套筒温度低于靶丸表面温度。

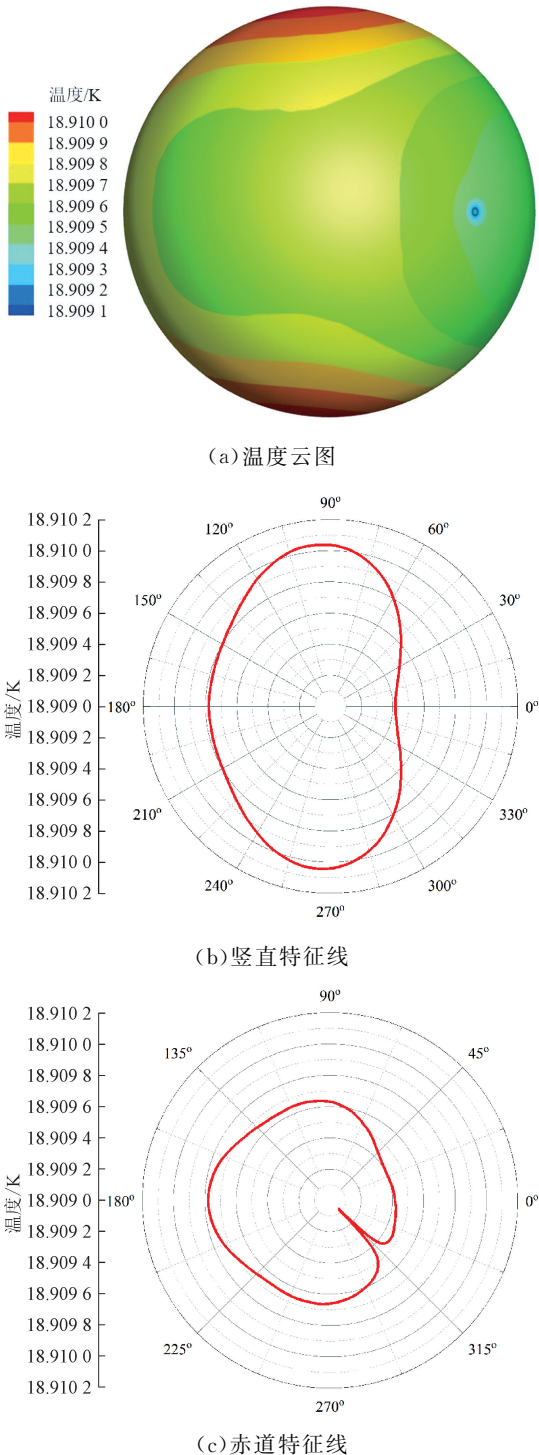


图 4 靶丸表面温度图

Fig. 4 Surface temperature distribution of capsule

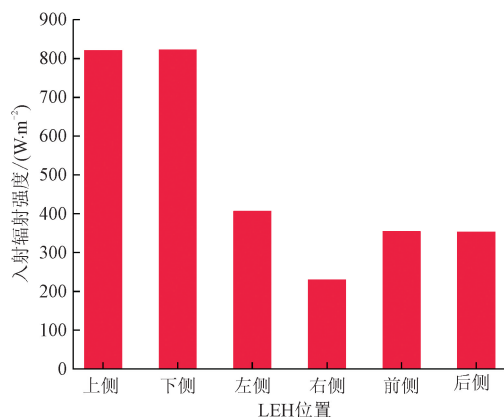


图 5 屏蔽罩开启前不同 LEH 位置的入射辐射强度

Fig. 5 Intensity of incident radiation with different LEH locations before the thermal shield removal

2.1.2 低温屏蔽罩开启过程温度场瞬态响应特性

低温屏蔽罩开启前,黑腔中靶丸内燃料的衰变热和进入腔内的外界辐射热通过氦气和充气管,经套筒传递至硅臂处,与硅臂所提供的冷流量进行热平衡。套筒与硅臂间的低温胶层,使得两者的接触面存在有温差,接触面上套筒的平均温度高于硅臂。套筒的材料为紫铜,硅臂的材料为高纯度单晶硅。在 18~20 K 温度下,紫铜的密度和比热容均大于硅,因此相同的传热量下,硅臂的温升大于套筒的温升。在低温屏蔽罩开启瞬间,大量的高温外界辐射热传入硅臂和套筒,硅臂表面发射率(0.6)大于套筒表面发射率(0.05),硅臂吸收的外界辐射热大于套筒,接触面的硅臂侧温度迅速上升,上升速率高于套筒侧,如图 6 所示,在 0.201 s 内接触面的硅臂侧平均温度高于套筒侧。套筒和硅臂接触位置热流密度变化如图 7 所示,可知这段时间内接触面的热流密

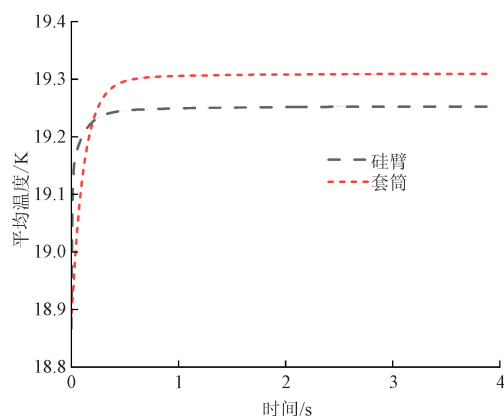


图 6 套筒和硅臂接触位置平均温度变化

Fig. 6 Variation of the average temperature of the contact position between TMP and silicon arm

度为正值,热量从硅臂侧涌入套筒侧,在 0.021 s 时接触面间的温差最大,从而热流密度达到峰值。因硅臂加热块处提供的冷流量对硅臂侧进行冷却,在 0.201 s 后,硅臂侧温度低于套筒侧,热流密度方向变回原来初始时刻状态(热量从套筒流向硅臂),并最终趋于稳定值 $-121.183\ 407\ 8\ \text{W/m}^2$ 。

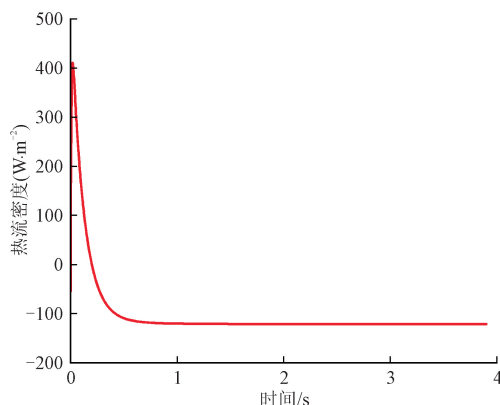


图 7 套筒和硅臂接触位置热流密度变化

Fig. 7 Variation of heat flux of the contact position between TMP and silicon arm

低温屏蔽罩开启过程中靶丸表面最高温度随时间变化曲线如图 8 所示,在外界辐射热影响下,靶丸表面最高温度快速上升,随着硅臂冷流量逐渐增加,上升变缓,最终趋于稳定值 19.334 27 K,温升为 424.2 mK。靶丸表面最大温差变化如图 9 所示,可知低温屏蔽罩开启过程前期,靶丸内热源热量、外界辐射热量和导冷量之间的平衡被破坏,靶丸表面温度均匀性迅速恶化,在 0.285 s 内,靶丸表面最大温差由原来的 0.97 mK 升至 5.74 mK。随着冷流量和外界辐射热量的平衡,靶丸表面最大温差快速降低,最终趋于稳定值 1.67 mK。

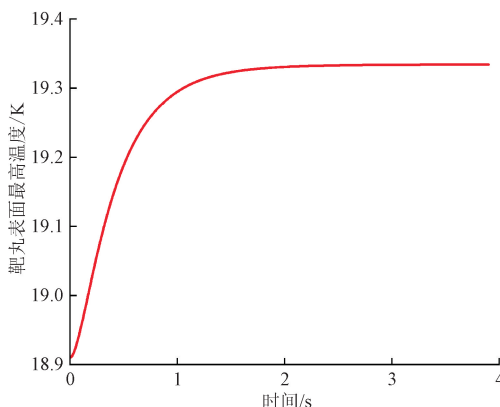


图 8 靶丸表面最高温度变化

Fig. 8 Variation of maximum surface temperature of capsule

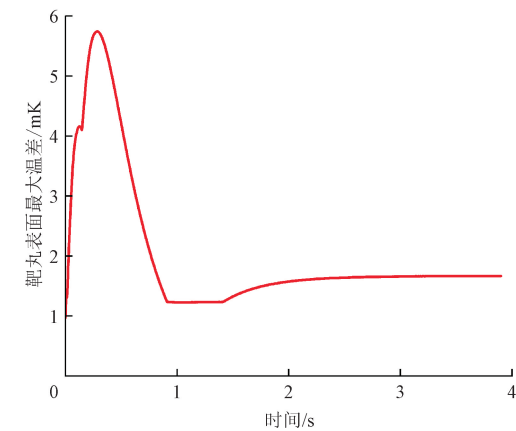


图 9 靶丸表面最大温差变化

Fig. 9 Variation of maximum surface temperature difference of capsule

不同时刻下,靶丸表面温度云图如图 10 所示,

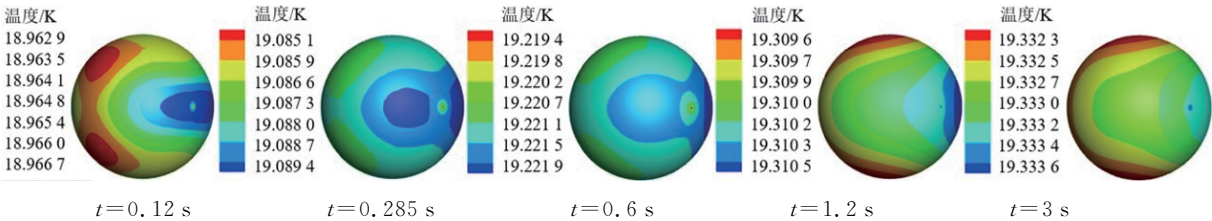
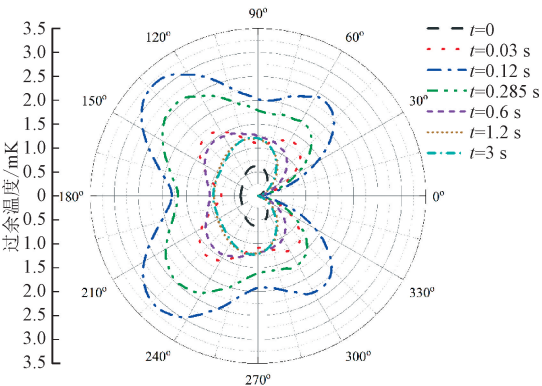
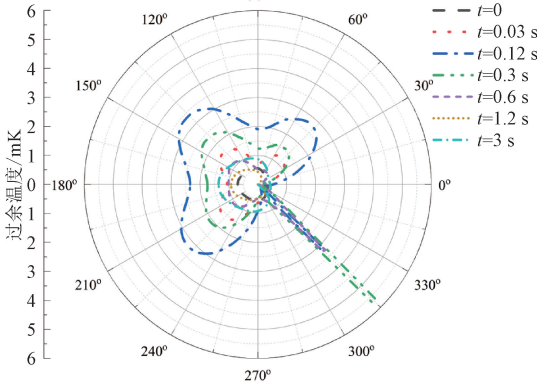


图 10 不同时刻靶丸表面温度云图

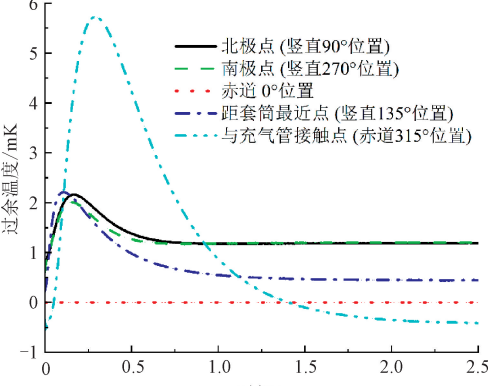
Fig. 10 Surface temperature contours of capsule at different moments



(a) 竖直特征线



(b) 赤道特征线



(c) 特征线上的特征点

图 11 靶丸表面特征线上温度变化

Fig. 11 Variation of temperature distribution of the characteristic lines on the surface of capsule

后因硅臂冷流量的传入,其过余温度值快速降低。至 $t=0.909$ s 时,靶丸表面最高温度点转移至南北两极点附近,而最低温度点保持不变,在辐射和氦气自然对流换热作用下最高温度点和最低温度点温升幅度近乎一致,因此最大温差变化很小,曲线变为水平直线。在 $t=1.413$ s 之后,最低温度点转移至与充气管接触位置,使得最低温度的增幅相对减小,最

大温差曲线有所上升后再趋于稳定。

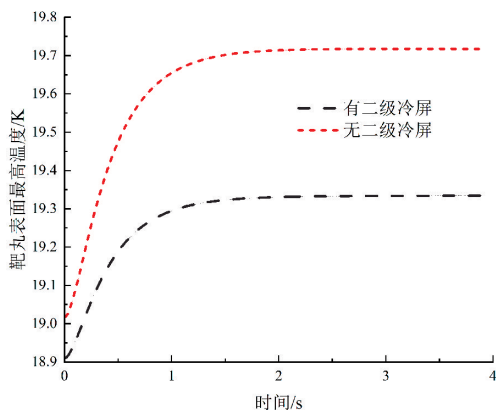
由以上分析可知,低温屏蔽罩开启过程中,靶丸表面温度的变化除了受外界热辐射的直接影响外,黑腔和充气管结构也是重要影响因素。

2.2 二级冷屏及其结构参数对瞬态温度特性的影响分析

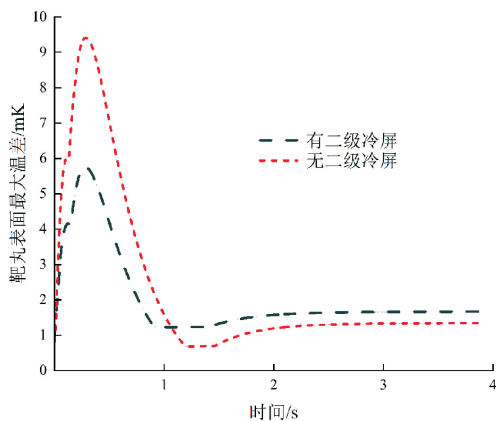
针对低温屏蔽罩开启过程中靶丸表面温度控制的要求,应尽量降低靶丸表面温度的温升,同时应降低靶丸表面温度均匀性的恶化程度。为了满足要求,对二级冷屏结构与位置的影响进行探究,并寻求最佳的二级冷屏结构条件。

2.2.1 二级冷屏作用分析

有、无二级冷屏结构下,靶丸表面温度变化如图 12 所示。由图 12 可知:有、无二级冷屏结构对靶丸表面温度瞬态曲线影响显著,增设二级冷屏结构,使得靶丸表面最高温度温升由 700.8 mK 降低至 424.2 mK,温升降低了 39.5%;靶丸表面最大温差的峰值由 9.41 mK 降为 5.74 mK,温度均匀性改善了 39.0%。



(a)最高温度

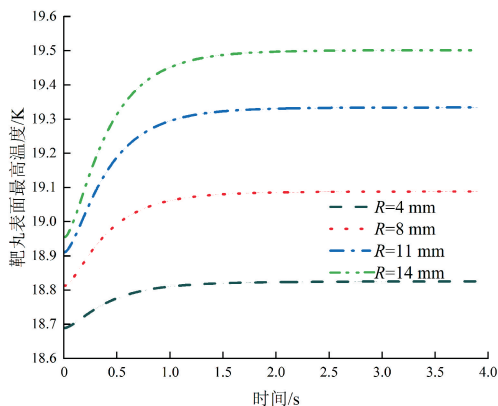


(b)最大温差

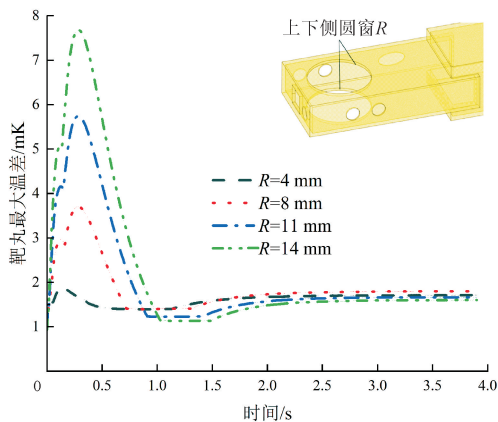
图 12 有/无二级冷屏结构下,靶丸表面温度变化
Fig. 12 Variation of surface temperature of capsule with or without fixed thermal shield

2.2.2 冷屏窗口尺寸的影响

不同二级冷屏上下侧壁面圆窗半径下,靶丸表面温度瞬态曲线如图 13 所示。在低温屏蔽罩开启过程中,减小圆窗半径,可以缩小外界高温辐射与硅臂正对的面积,使更少的外界辐射热传入硅臂,靶丸表面温升、靶丸表面最大温差的峰值随圆窗半径的减小而减小。



(a)最高温度



(b)最大温差

图 13 不同圆窗半径下,靶丸表面温度变化

Fig. 13 Variation of surface temperature of capsule with different round window radius

不同圆窗半径下,靶丸表面最高温度的温升和最大温差的峰值变化如图 14 所示。由图 14 可知,随着圆窗半径的缩小,靶丸表面最高温度的温升和最大温差的峰值都显著降低,以 $R=14$ mm 为对照,当 R 为 11、8、4 mm 时,靶丸表面最高温度的温升分别降低了 22.6%、49.6%、75.1%,靶丸表面温度均匀性分别改善了 25.2%、51.7%、87%。因此,在实际工程设计中,在条件允许的范围下,尽量缩小上下圆窗半径,有利于满足对低温屏蔽罩开启过程中靶丸表面温度的控制要求。

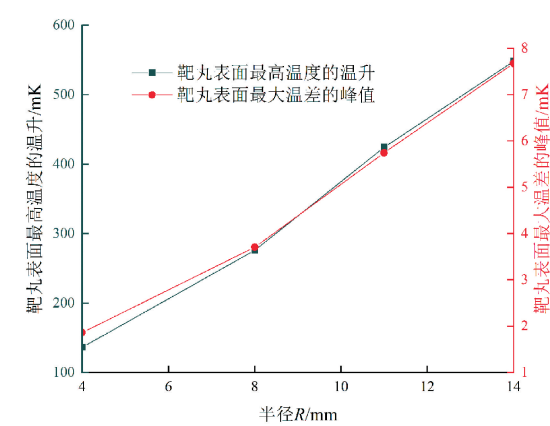


图 14 不同圆窗半径下靶丸表面最高温度的温升和最大温差的峰值变化

Fig. 14 Variation of $T_{\max}$ and $\Delta T_{\max}$ with different round window radius

2.2.3 冷屏壁面位置的影响

上下侧壁面平移时,靶丸表面温度变化如图 15 所示,不同壁面平移时,靶丸表面最高温度温升和最大温差的峰值变化如图 16 所示。

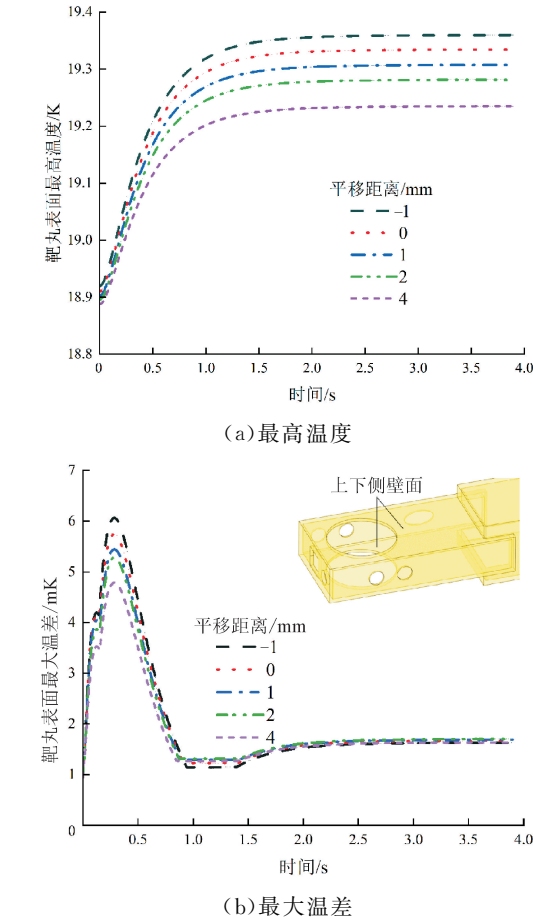


图 15 上下侧壁面平移时靶丸表面温度的变化

Fig. 15 Variation of surface temperature of capsule at different upper and lower side wall positions

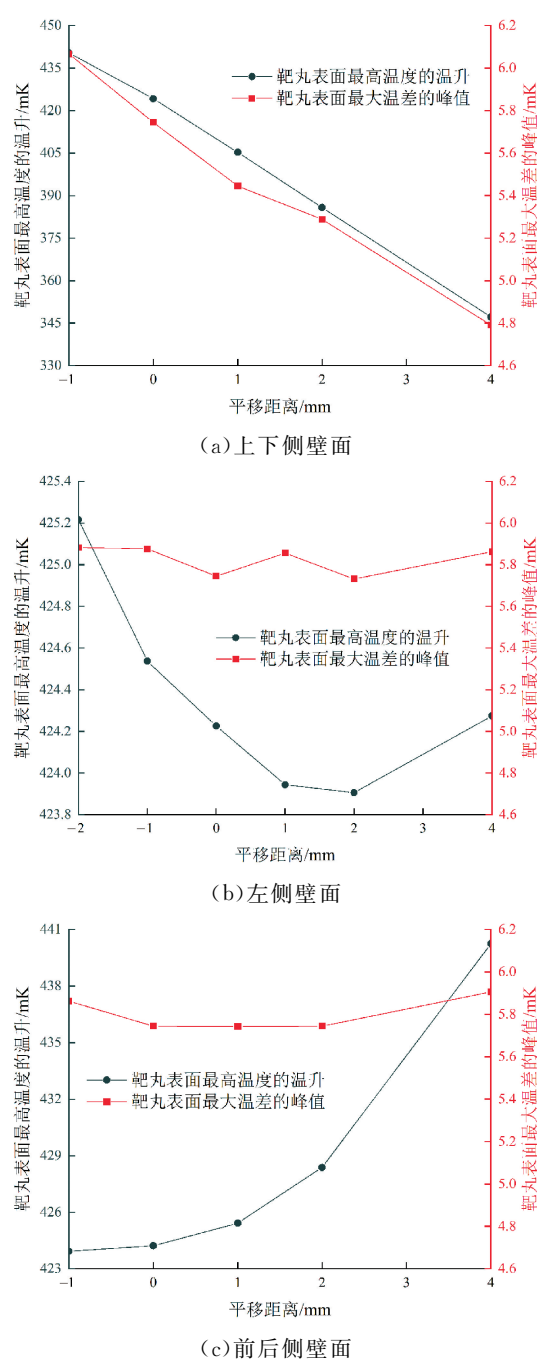


图 16 不同壁面平移时,靶丸表面最高温度温升和最大温差的峰值变化

Fig. 16 Variation of $T_{\max}$ and $\Delta T_{\max}$ at different wall translation

由图 15、16(a)可知,二级冷屏上下侧壁面平移时,靶丸表面温度瞬态特性曲线规律一致,壁面离中心点距离越远,对外界辐射热的阻挡效果越好,靶丸表面最高温度的温升和最大温差的峰值都有明显降低。当二级冷屏左侧、前后侧壁面平移时,由于除了上下侧壁面的圆窗,其他壁面的开窗尺寸均较小,靶丸表面的最高温度和最大温差瞬态曲线基本重合。由图 16(b)、(c)可知,最大温差的峰值在这两个方

向平移的变化均小于 0.2 mK,当左侧壁面向远离中心点平移 2 mm 时,为最佳的位置点,而前后侧壁面在基准位置处为最优。

不同壁面平移时的温升敏感系数和温度均匀系数如图 17 所示,可知上下侧方向的温升敏感系数为 $24.877\ 3\ \text{K} \cdot \text{m}^{-1}$,是左侧方向的 127 倍、前后侧方向 9 倍。上下侧方向温度均匀系数为 $0.253\ 9\ \text{K} \cdot \text{m}^{-1}$,是左侧方向的 5 倍,是前后侧方向 7 倍。二级冷屏各个壁面结构在上下侧的平移方向上,对低温屏蔽罩开启过程靶丸表面温度场瞬态规律的影响最大,且远大于另外两个平移方向。在实际设计中,可通过增大二级冷屏上下侧壁面与靶丸中心处的距离,来降低低温屏蔽罩开启过程中靶丸表面的温升和温度均匀性的恶化程度。

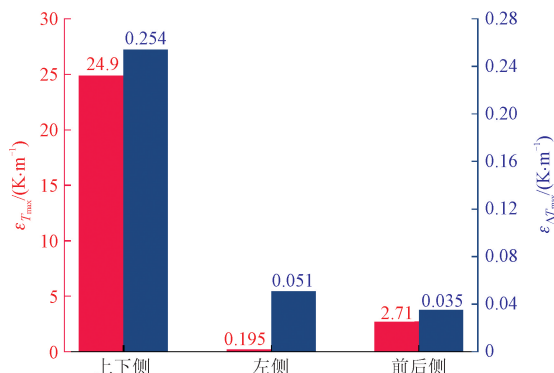


图 17 不同壁面平移时的温升敏感系数和温度均匀系数

Fig. 17 Temperature rise sensitivity coefficient and temperature uniformity coefficient at different wall translation

3 结 论

本文通过对带二级冷屏结构的全冷链六端直柱腔冷冻靶进行三维建模,采用了数值模拟的方法对低温屏蔽罩开启过程中靶丸表面温度的瞬态特性进行计算分析,重点研究了二级冷屏的结构及位置对靶丸表面温度瞬态特性的影响规律,得到如下结论。

(1)低温屏蔽罩开启过程中,外界大量辐射热进入冷冻靶,靶丸表面温度快速上升,靶丸表面温度均匀性迅速恶化,随着硅臂传入套筒的冷流量逐渐增大,靶丸表面温度上升变缓并趋于稳定,靶丸表面最大温差在达到峰值后降低,最终趋于稳定。

(2)二级冷屏结构能有效的阻挡低温屏蔽罩开启时部分外界的高温辐射热进入,使靶丸表面最高温度的温升降低了 39.5%,靶丸表面温度的均匀性改善了 39%。

(3)靶丸表面温度最高温度的温升和靶丸表面

最大温差的峰值随二级冷屏上下侧壁面的圆形窗口半径减小、上下侧壁面到靶丸中心处距离增大,均有明显降低。

(4)二级冷屏前端上下侧壁面的位置变化对靶丸表面温度瞬态特性产生的影响远大于其他壁面。上下侧方向的温升敏感系数分别是左侧、前后侧方向的 127 倍、9 倍,上下侧方向温度均匀系数为左侧方向的 5 倍、前后侧方向的 7 倍。

参考文献:

- [1] MA T, PATEL P K, IZUMI N, et al. Onset of hydrodynamic mix in high-velocity, highly compressed inertial confinement fusion implosions [J]. Physical Review Letters, 2013, 111(8): 085004.
- [2] GLENZER S H, SPEARS B K, EDWARDS M J, et al. First implosion experiments with cryogenic thermonuclear fuel on the national ignition facility [J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2012, 54(4): 045013.
- [3] MOSES, EDWARD I. Ignition on the National Ignition Facility: a path towards inertial fusion energy [J]. Nuclear Fusion, 2009, 49(10): 104022.
- [4] CLARK D S, WEBER C R, KRITCHER A L, et al. Modeling and projecting implosion performance for the National Ignition Facility [J]. Nuclear Fusion, 2019, 59(3): 032008.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] YAN Ji, ZHANG Xing, LI Jiwei, et al. Preliminary experiments of the hohlraum-driven double-shell implosion on ShenGuang-III laser facility [J]. Nuclear Fusion, 2018, 58(7).
- [9] ABU-SHAWAREB H, ACREE R, ADAMS P, et al. Lawson criterion for ignition exceeded in an inertial fusion experiment [J]. Physical Review Letters, 2022, 129(7): 075001.
- [10] CLERY D. Explosion marks laser fusion breakthrough [J]. Science, 2022, 378(6625): 1154-1155.

- [11] 高莎莎, 吴小军, 何智兵, 等. 激光惯性约束聚变靶制备技术研究进展 [J]. 强激光与粒子束, 2020, 32(3): 17-26.
- GAO Shasha, WU Xiaojun, HE Zhibing, et al. Research progress of fabrication techniques for laser inertial confinement fusion target [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32(3): 17-26.
- [12] LINDL J D, AMENDT P, BERGER R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility [J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(2): 339-491.
- [13] HAANS W, SALMONSON J D, CLARK D S, et al. NIF ignition target requirements, margins, and uncertainties [J]. Fusion Science and Technology, 2011, 59(1): 1-7.
- [14] MCKENTY P W, GONCHAROV V N, TOWN R, et al. Analysis of a direct-drive ignition capsule designed for the National Ignition Facility [J]. Physics of Plasmas, 2001, 8(5): 2315-2322.
- [15] MOLL G, MARTIN M, BACLET P. Thermal simulations of the LMJ cryogenic target [J]. Fusion Science and Technology, 2007, 51(4): 737-746.
- [16] MOLL G, CHARTON S. Update on thermal and hydrodynamic simulations on LMJ cryogenic targets [J]. Fusion Science and Technology, 2004, 45(2): 233-244.
- [17] 郭富城, 李翠, 厉彦忠. 定向红外光空间分布误差对冷冻靶温度场的影响分析 [J]. 物理学报, 2022, 71(11): 110-122.
- GUO Fucheng, LI Cui, LI Yanzhong. Influence of directional infrared irradiations on the temperature field in ICF cryotargets [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(11): 110-122.
- [18] 陶朝友, 刘喜川, 林伟, 等. 冷冻靶的环境热辐射屏蔽技术研究 [J]. 原子能科学技术, 2022, 56(8): 1707-1713.
- TAO Chaoyou, LIU Xichuan, LIN Wei, et al. Environmental thermal radiation shielding technology of cryogenic target [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(8): 1707-1713.
- [19] BHANDARKAR S, FAIR J, HAID B, et al. Prevention of residual gas condensation on the laser entry hole windows on cryogenic NIF targets using a protective warm film [J]. Fusion Science and Technology, 2018, 73(3): 380-391.
- [20] 陈冠华, 李翠, 郭富城, 等. 冷冻靶屏蔽罩温度扰动动态特性分析 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(6): 113-120.
- CHEN Guanhua, LI Cui, GUO Fucheng, et al. Dynamic thermal characteristics of cryogenic target under temperature disturbance of thermal shield [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(6): 113-120.
- [21] HARDING D R, WITTMAN M D, REDDEN N P, et al. Comparison of shadowgraphy and X-ray phase contrast methods for characterizing a DT ice layer in an inertial confinement fusion target [J]. Fusion Science and Technology, 2020, 76(7): 814-830.
- [22] 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.
- [23] LONDON R A, MOOD J D, SANCHEZ J J, et al. Thermal infrared exposure of cryogenic indirect drive ICF targets [J]. Fusion Science and Technology, 2006, 49(4): 581-587.
- [24] 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.
- [25] 郭富城, 李翠, 陈冠华, 等. 辐射条件下冷冻靶靶丸表面及充气管温度特性数值研究 [J]. 原子能科学技术, 2020, 54(11): 2201-2208.
- GUO Fucheng, LI Cui, CHEN Guanhua, et al. Numerical investigation on temperature characteristic of capsule surface and filling tube of cryogenic target under radiation condition [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, 54(11): 2201-2208.
- [26] 李翠, 赵小迪, 李黎, 等. 微充气管残留燃料冰对冷冻靶控温过程的影响分析 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(6): 50-57.
- LI Cui, ZHAO Xiaodi, LI Li, et al. Influence of residual fuel ice in micro gas filling tube on the temperature control of ICF cryogenic target [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(6): 50-57.
- [27] 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 and Design, 2018, 127: 23-33.
- [28] 胡孟华, 李翠, 陈冠华, 等. 多孔注入冷冻靶快速降温过程瞬态特性研究 [J]. 原子能科学技术, 2022, 56(10): 2223-2231.
- HU Menghua, LI Cui, CHEN Guanhua, et al. Transient thermal characteristics of cryogenic target with multiple laser entrance holes during quick-freezing process [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(10): 2223-2231.