

冷冻靶校准误差和烧蚀层粗糙度对 氘氚层均匀性的影响*

杨晓虎¹, 徐 涵², 田成林¹, 银 燕¹, 卓红斌²

(1. 国防科学技术大学 理学院, 长沙 410073; 2. 国防科学技术大学 计算机学院, 长沙 410073)

摘 要: 理论分析了氘氚层外表面的温差与其粗糙度间的关系;以法国兆焦激光装置 LMJ 为原型,利用计算流体力学程序 Fluent,分别模拟了靶丸轴向偏离黑腔中心不同尺度和烧蚀层存在不同大小的非均匀厚度对氘氚层温度分布的影响,求得了这两种误差引起氘氚层厚度的非均匀度。结果表明:为了满足点火靶的要求,靶丸轴向偏离腔体中心的尺度须在 $8.5 \mu\text{m}$ 内,烧蚀层轴向粗糙度则应控制在 $0.72 \mu\text{m}$ 内。

关键词: 惯性约束聚变; 间接驱动靶; 冷冻靶; 氘氚层; 粗糙度; 均匀性; 轴向偏离

中图分类号: O532.13; O411.3

文献标志码: A

惯性约束聚变(ICF)间接驱动靶中,为了抑制激光打靶时流体力学不稳定性的发展,冷冻靶的质量均匀度必须大于 99%,且内表面粗糙度的均方根要小于 $1 \mu\text{m}$ ^[1-3]。氘氚(DT)冷冻靶是实现 ICF 点火的首选靶型,通常采用 β 分层技术^[4-5]来实现其冷冻层的均匀分布。由于 DT 层内表面的粗糙度与靶的温度分布紧密联系,为了提高 DT 层质量分布的均匀性,必须保证靶周围能有球对称的等温分布。当冷冻靶精确定位于腔体正中心且烧蚀层厚度均匀时,通过对腔体施加辅助加热以补偿腔体非球对称性的影响^[6-8],及在腔中适当位置加入聚合薄膜对腔体进行分隔以减小填充气体的自然对流对靶丸温度均匀性的破坏^[3,9]等措施,可以获得满足聚变点火要求的靶丸温度分布。

实际工程中,靶丸校准和烧蚀层的制备误差是不可避免的。本文结合理论分析与数值模拟,研究了这两种误差对靶丸均匀性的影响;利用计算流体力学程序 Fluent,在 2 维轴对称模型下,只考虑热传导和辐射传热,研究靶丸轴向偏离腔体中心不同尺度及烧蚀层的非均匀厚度对 DT 层温度分布的影响,得到两种误差下 DT 层粗糙度均方根值,给出点火靶丸安装精度和烧蚀层非均匀厚度的要求。

1 DT 层粗糙度与温度的关系

DT 层中由于 β 衰变将有均匀的体积热生成。稳态下,若 DT 层球对称分布,即 DT 的厚度均匀且热量严格按径向传递,则 DT 层内的热传导方程为^[10]

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dT}{dr} \right) + \frac{q}{k} = 0 \quad (1)$$

式中: r 为 DT 层的半径; T 为 DT 层的温度; k 为 DT 层的热传导系数; q 为 DT 层中单位体积、单位时间内生成的热。假设 DT 层内半径 R_i 处的温度为 T_i ,DT 层外半径 R_o 处的温度为 T_o ,忽略 DT 气体的体积热,则 DT 层内表面的温度梯度为 0。求解式(1)可得 DT 层内外表面的温差为

$$T_i - T_o = \frac{1}{6} \frac{q}{k} [R_o^2 - R_i^2 - 2R_i^3 \left(\frac{1}{R_i} - \frac{1}{R_o} \right)] \quad (2)$$

靶丸周围温度均匀时,氘的 β 衰变会使 DT 层厚度均匀化。实际工程中,当靶丸在校准过程中偏离腔体中心或烧蚀层厚度不均匀时,会造成 DT 层向外传递的热量分布不均匀,导致 DT 层的质量重新分布。这是因为 DT 的蒸汽压与温度相关,温度高的内表面附近的蒸汽压大于低温表面附近的蒸汽压,压强梯度的存在会导致 DT 质量从高温处向低温处转移,使得温度较低点的 DT 层厚度增加,温度较高的点则变薄。当 DT 的蒸气压与其内表面温度达到平衡时,内表面温度 T_i 将趋于一致。考虑到此时 T_i 和 R_o 为常数,对式(2)求微分,并整理得

* 收稿日期:2008-07-10; 修订日期:2008-11-24

基金项目:国家高技术发展计划项目;国家自然科学基金项目(10576035,10555030,10605038)

作者简介:杨晓虎(1983—),男,硕士研究生,主要从事 ICF 冷冻靶制备研究; xiaohu215@126.com。

$$\Delta T_o = \frac{qR_i}{k} \left(1 - \frac{R_i}{R_o}\right) \Delta R_i \quad (3)$$

式中： ΔT_o 为 DT 层外表面的温差； ΔR_i 为 DT 层内表面半径差。当 DT 层内表面厚度只有一极大值时，即 DT 内表面整体相对于黑腔中心往某个方向移动了 $\Delta R_i/2$ 的距离。1 维情况下，移动后的 DT 层内表面满足方程

$$(R\cos\theta)^2 + (R\sin\theta - \Delta R_i/2)^2 = R_i^2 \quad (4)$$

式中： R 为移动后的 DT 层内表面半径。考虑到 R 为正数，由式(4)可得

$$R(\theta) = \frac{\Delta R_i \sin\theta}{2} + \sqrt{R_i^2 - \frac{(\Delta R_i \cos\theta)^2}{4}} \quad (5)$$

从而 DT 层内表面粗糙度的均方根可表示为

$$\delta_{\text{RMS}(\Delta R_i)} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [R(\theta) - R_i]^2 d\theta} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \frac{2.9 \sin\theta}{R_i} \left(\frac{R_o}{R_o - R_i} \right) \Delta T_o + \sqrt{R_i^2 - \left[\frac{2.9 \cos\theta}{R_i} \left(\frac{R_o}{R_o - R_i} \right) \Delta T_o \right]^2} - R_i \right\}^2 d\theta} \quad (6)$$

图 1 为 3 种国际上主流靶的 DT 层内表面粗糙度的均方根与 DT 层外表面温差的关系，其中美国的 OMEGA 装置为直接驱动靶， $R_i = 327 \mu\text{m}$, $R_o = 427 \mu\text{m}$ ，国家点火装置 NIF $R_i = 1\ 350 \mu\text{m}$, $R_o = 1\ 690 \mu\text{m}$ ，法国的兆焦激光装置 LMJ $R_i = 940 \mu\text{m}$, $R_o = 1\ 040 \mu\text{m}$ 。由图 1 可以看出：当 DT 层外表面存在相同的最大温差时，大尺寸靶丸的内表面粗糙度相比小尺寸靶丸要小很多。当然，靶丸尺寸越大对点火过程中激光能量的要求也越高。

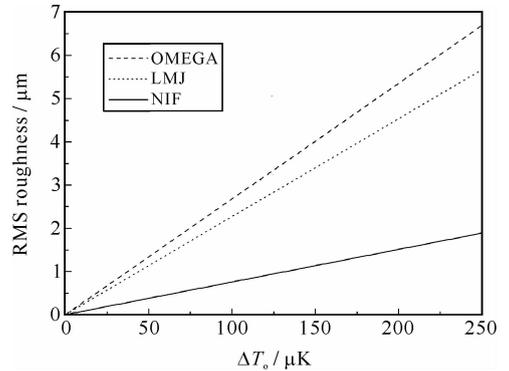


Fig. 1 RMS roughness of DT inner surface vs temperature difference of DT outer surface

图 1 DT 层内表面粗糙度的均方根随其外表面温差的变化

在下文的数值模型中没有考虑 β 衰变导致的 DT 气体和固体间的相变过程，故当靶丸周围存在温差时，得到的是 DT 质量重新分布前的 DT 层温度分布，此时 DT 内表面必然会有温差。事实上由于 DT 层中氘的 β 衰变，内表面最终会形成均匀的等温面。考虑靶内表面厚度仅存在一极大值时，将模拟得到的 DT 层外表面两极值点的温差 ΔT_o 代入式(3)，可估算得实际中 DT 层内半径的变化，进而可得其粗糙度的均方根大小。

2 计算模型与数值分析

2.1 计算模型

本文的间接驱动靶装置及靶尺寸以法国的 LMJ 装置为原型，具体参数为^[10-12]：聚变腔为金材料的柱形黑腔(热传导系数 $k_h = 1\ 080 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ，发射率 $\epsilon_h = 0.05$)，其外径为 6 mm，长 10 mm，壁厚 $50 \mu\text{m}$ ；腔内填充有按等摩尔体积混合的低压氘氢气体(密度 $\rho_g = 0.88 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，热传导系数 $k_g = 0.022 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)；腔两个端部各有一直径为 3 mm 的圆形激光入口(LEH)，上面密封有 $0.4 \mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺薄膜($k_{\text{poly}} = 0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ， $\epsilon_{\text{poly}} = 0.4$)；腔体两端分别连接一个铝冷却环($k_{\text{Al}} = 7\ 630 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ， $\epsilon_{\text{Al}} = 0.04$)，外径为 10 mm，高 2 mm，每个环通过一对冷却棒连接到制冷源上；模拟中，冷却环的温度均设为 19.47 K。为降低外界辐射能量对靶丸温度均匀性的影响，冷冻装置的外围罩有一个铝制的低温热屏蔽罩，其内部为真空环境，辐射温度为 23.5 K。

冷冻靶的直径为 2.43 mm，采用球壳靶构造：最外层是碳氢聚合物($k_{\text{CH}} = 0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)为材料的烧蚀层，其厚度为 $175 \mu\text{m}$ ；DT 冰($k = 0.29 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)紧贴于烧蚀层的内表面，厚度为 $100 \mu\text{m}$ ；中心是 DT 气体($\rho_{\text{DTg}} = 0.28 \text{ kg}/\text{m}^3$ ， $k_{\text{DTg}} = 0.08 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)。DT 层中 β 衰变所释放的体积热为 $5 \times 10^4 \text{ W}/\text{m}^3$ ，不计 DT 气体的体积热。靶丸由约为 $1 \mu\text{m}$ 厚的 2 张聚合薄膜($k_{\text{film}} = 0.05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)支撑在黑腔的中心位置。将参数代入式(2)，可得 DT 内外表面温差为 $806.8 \mu\text{K}$ 。

模拟中我们结合辅助加热，且把辅助加热设在腔外壁的中平面上下各 1.3 mm 的范围，即为 2 个加热圈，每个加热圈上热流密度为^[8] $635 \text{ W}/\text{m}^2$ 。模拟中不计重力的影响，即忽略氦、氢气体的自然对流对靶丸温度分布的影响，因此，不考虑腔体的多分区模型^[3,9]。同时不计腔体各部分的接触面之间及腔体和冷却环等的接触

面间的热阻。

我们根据 LMJ 结构的相关参数建立了一个 2 维的轴对称模型,如图 2 所示。首先由 Fluent 公司的前置处理器 GAMBIT 生成非均匀网格模型,然后将模型导入 Fluent 中进行数值计算。

2.2 数值分析

本文的轴对称模型中,当冷冻靶置于腔体正中心且烧蚀层厚度均匀时,靶丸近似处于均匀的球对称等温环境中,此时,DT 内外表面间温差为 $803 \mu\text{K}$,与理论计算的结果 $806.8 \mu\text{K}$ 只有 0.5% 的误差。

考虑到腔体和靶丸结构的对称性,只研究靶丸在校准中沿着轴向偏离腔体中心时对 DT 层均匀性的影响。当靶丸偏离腔体中心 $30 \mu\text{m}$ 时,靶丸远离激光入口的表面温度有整体的提高,而接近激光入口的靶丸表面温度则降低了,但其径向的温度分布与靶丸处于腔体正中心时的温度分布没有发生明显变化。轴向温度模式则有了较大的改变。

图 3 为靶丸偏离腔体中心 $30 \mu\text{m}$ 时,DT 质量重新分布前其内表面沿轴向的温度分布。由图 3 可以看出:靶丸远离腔体中心的面的温度要低于靠近中心的面的温度,这是因为靶丸 β 衰变产生的热流量通过周围的氦氢气体流向腔壁时,热阻会随着距离的增加而增大,致使接近腔壁处比远离腔壁处温度更低。此时 DT 层外表面的温差为 $103 \mu\text{K}$,氦的 β 衰变会使 DT 通过升华和凝华等过程使质量重新分布,即温度较低点的 DT 层厚度增加,温度较高的点则变薄,最终使内表面的温度趋于一致。将 DT 层外表面的温差代入公式(3)中求解,可得 DT 层离腔体中心较远的极点厚 $103.3 \mu\text{m}$,靠近中心的极点厚 $96.7 \mu\text{m}$,由公式(6)可以得到内表面粗糙度的均方根达到 $2.33 \mu\text{m}$ 。

显然,靶丸偏离腔体中心 $30 \mu\text{m}$ 所引起的 DT 层内表面的粗糙度已经远大于实现聚变点火的要求,需要提高靶丸的校准精度。

图 4 为靶丸轴向偏离腔体中心 $10, 20$ 和 $30 \mu\text{m}$ 等不同尺度时,DT 层外表面的温差大小及最终将导致内表面粗糙度均方根的变化情况。由图可以看出:随着靶丸偏离腔体中心的距离增大,DT 层外表面的温差迅速增大,导致 DT 层内表面的粗糙度也很快增加。因此,必须严格控制靶丸的偏离程度。利用三阶多项式对 DT 层的粗糙度进行拟合得到,为了使 DT 层内表面粗糙度的均方根小于 $1 \mu\text{m}$,轴向偏离必须保证在 $8.5 \mu\text{m}$ 之内。

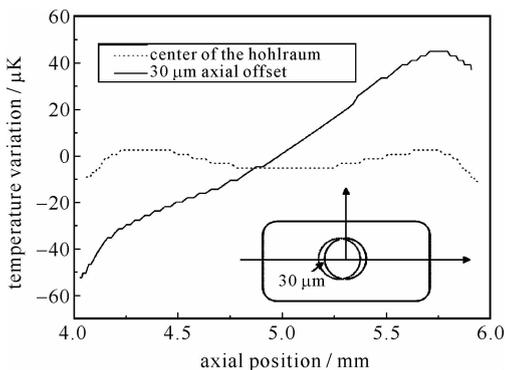


Fig. 3 Axial temperature profiles of DT inner surface when the axial offset of target is $30 \mu\text{m}$

图 3 靶轴向偏离中心 $30 \mu\text{m}$ 时
DT 内表面温度沿轴向的分布

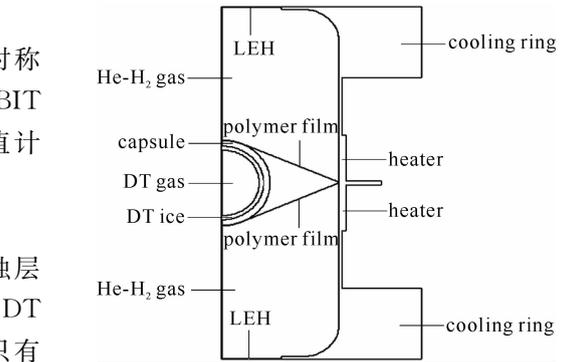


Fig. 2 Basic configuration of 2D axial symmetric model

图 2 2 维轴对称模型

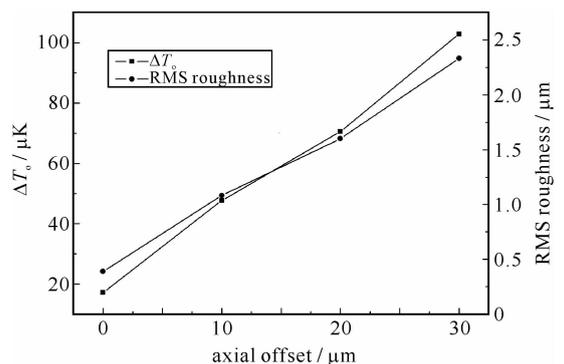


Fig. 4 DT outer surface temperature difference and RMS roughness of inner surface vs axial offset of target

图 4 靶轴向偏离中心不同尺度时
DT 外表面温差及内表面粗糙度均方根的变化

由于烧蚀层、氦氢气体和 DT 层的热传导系数在量级上有较大差异,故烧蚀层的厚度不均匀会引起 DT 层外表面温度的非均匀分布,最终增大 DT 层的粗糙度。考虑烧蚀层厚度有一极大值的情况对 DT 层温度均匀性的影响,模型中烧蚀层的外球壳沿着轴向整体移动 $5 \mu\text{m}$,形成图 5 所示的烧蚀层非均匀厚度,厚度均匀的 DT 层紧贴于烧蚀层内表面。模拟得到 DT 层内表面温度沿轴向的分布,见图 5。可以看出:烧蚀层较厚的一

端的 DT 层内表面温度要明显低于薄的一端,这是由于烧蚀层的热传导系数大于氦氢气体的热传导系数,使得 DT 中 β 衰变产生的体积热更容易传向腔壁,导致烧蚀层较厚一端的 DT 层温度降低,从而使此处的 DT 层质量增加。此时,DT 层外表面的温差达到 $202.2 \mu\text{K}$,将此温差代入理论公式(3)和(6)中求解,得到 DT 层内表面粗糙度的均方根达到了 $4.59 \mu\text{m}$ 。

图 6 为烧蚀层非均匀厚度为 $0.5, 1, 3$ 和 $5 \mu\text{m}$ 时,DT 层外表面温差的变化及最终导致其内表面粗糙度的情况。可以看出:随着烧蚀层不均匀性的增加,DT 层外表面温差及内表面粗糙度都急剧变大。相比起靶丸偏离黑腔中心,烧蚀层的非均匀性对 DT 层粗糙度的影响更为强烈。对图 6 中 DT 层粗糙度的均方根随烧蚀层非均匀厚度的变化,仍利用三阶多项式进行拟合,结果表明:要使 DT 层内表面粗糙度的均方根小于 $1 \mu\text{m}$,烧蚀层的粗糙度必须在 $0.72 \mu\text{m}$ 之内。因此必须尽可能地提高烧蚀层厚度的均匀性。模拟中,当靶丸处于正中心且烧蚀层均匀时,DT 层外表面仍存在 $17.2 \mu\text{K}$ 的温差。若为完全理想情况,扣除原始温差,靶丸校准的偏离和烧蚀层的非均匀厚度引起的 DT 层温度及厚度的不均匀性会有适当减小。

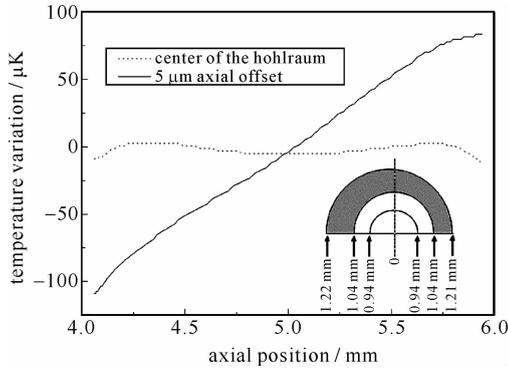


Fig. 5 Axial temperature profiles of DT inner surface when the capsule thickness is nonuniform

图 5 烧蚀层厚度非均匀时 DT 层内表面温度沿轴向的分布

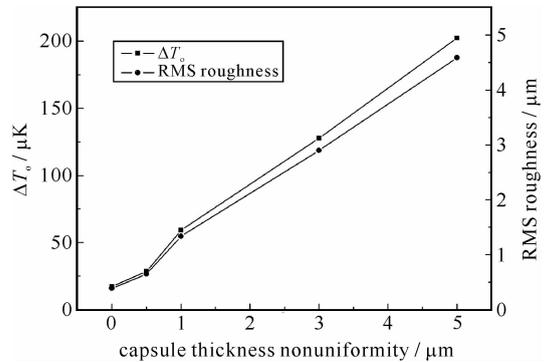


Fig. 6 DT outer surface temperature difference and inner surface RMS roughness vs capsule thickness nonuniformity

图 6 烧蚀层不同尺度的非均匀厚度时 DT 外表面温差及内表面粗糙度均方根的变化

3 结 论

本文理论分析和数值模拟相结合,研究了间接驱动靶中靶丸校准和烧蚀层制备误差对 DT 层质量分布均匀性的影响情况。研究表明:为了满足点火时 DT 层质量均匀性的要求,靶丸校准中轴向偏离腔体中心的误差须保证在 $8.5 \mu\text{m}$ 内,烧蚀层轴向粗糙度控制在 $0.72 \mu\text{m}$ 内。由于腔体的构造,靶丸或是烧蚀层厚度的径向偏离对 DT 层均匀性的影响更为显著,因此,应避免径向上存在的校准误差和烧蚀层非均匀厚度。尽管本文是以 LMJ 为原型,但以上问题在任何 ICF 的间接驱动靶(包括我国的神光系列装置)中都会存在,也是需要解决的,只是随着间接驱动靶的规格、大小等的差异,偏离误差和烧蚀层粗糙度的要求不同,而这些都很容易通过本文建立的理论和数值模型得到。

致 谢 感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心的唐永建研究员、杨存榜研究员和雷海乐副研究员的帮助和有益讨论。

参考文献:

[1] 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]. *Phys Plasmas*, 2004, **11**(2):339-491.

[2] McKenty P W, Goncharov V N, Town R P J, et al. Analysis of a direct-drive ignition capsule designed for the National Ignition Facility[J]. *Phys Plasmas*, 2001, **8**(5):2315-2322.

[3] Moll G, Balet P, Martin M. Recent results in thermal and hydrodynamic simulations of cryogenic target for LMJ[J]. *Fusion Sci Technol*, 2006, **49**(4):574-580.

[4] Martin A J, Simms R J, Jacob R B. Beta energy driven uniform deuterium-tritium ice layer in reactor-size cryogenic inertial fusion targets [J]. *J Vac Sci Technol A*, 1988, **6**(3):1885-1888.

[5] Hoffer J K, Foreman L R. Radioactively induced sublimation in solid tritium[J]. *Phys Rev Lett*, 1988, **60**(13):1310-1313.

[6] Sanchez J J, Giedt W H. Thermal control of cryogenic cylindrical hohlraums for indirect-drive inertial confinement fusion[J]. *Fusion Sci Technol*, 1999, **36**(3):346-355.

- [7] Moll G, Charton S. Update on thermal and hydrodynamic simulations on LMJ cryogenic targets[J]. *Fusion Sci Technol*, 2004, **45**(2):233-244.
- [8] 杨晓虎,徐涵,田成林,等. 冷冻靶制备中辅助加热的理论和数值分析[J]. 强激光与粒子束, 2008, **20**(8):1279-1282. (Yang Xiaohu, Xu Han, Tian Chenglin, et al. Theoretical and numerical analysis of auxiliary heating for cryogenic target fabrication. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, **20**(8):1279-1282)
- [9] Sanchez J J, Giedt W H. Thin films for reducing tamping gas convection heat transfer effects in a national ignition facility hohlraum[J]. *Fusion Sci Technol*, 2003, **44**(4):811-819.
- [10] Sanchez J J, Giedt W H. Predicting the equilibrium deuterium-tritium fuel layer thickness profile in an indirect-drive hohlraum capsule[J]. *Fusion Sci Technol*, 2004, **45**(2):253-261.
- [11] Charton S, Fabre A, Baclot P. Cryogenic indirect drive target: a thermal study[J]. *Fusion Sci Technol*, 2000, **38**(1):156-160.
- [12] Moll G, Martin M, Baclot P. Thermal simulations of the LMJ cryogenic target[J]. *Fusion Sci Technol*, 2007, **51**(4):737-746.

Effects of cryogenic target misalignment and capsule nonuniformity on deuterium-tritium layer uniformity

Yang Xiaohu¹, Xu Han², Tian Chenglin¹, Yin Yan¹, Zhuo Hongbin²

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. College of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The interrelation between the temperature difference of the deuterium and tritium(DT) outer surface and roughness of the DT layer has been obtained in theory for the indirect drive targets of inertial confinement fusion. Taking the Laser Magajoule(LMJ) as a prototype, the effects of target misalignment from the center of the hohlraum on the axial axis and the nonuniformity of the capsule on the DT layer temperature profiles have been simulated with a CFD code (Fluent). Then, the thickness nonuniformities of the DT layer have been calculated with the theoretical expression. The results show that in order to satisfy the requirement of ignition, the target misalignment must be less than $8.5 \mu\text{m}$, and the RMS roughness of the capsule should be controlled in $0.72 \mu\text{m}$.

Key words: ICF; indirect drive target; cryogenic target; deuterium-tritium layer; roughness; uniformity; axial misalignment