

文章编号: 1001-4322(2007)08-1283-04

# 激光非均匀性对内界面变形影响的数值模拟\*

郁晓瑾, 吴俊峰, 叶文华

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 使用 LARED-S 程序, 参照 NIF 直接驱动 DT 点火靶, 模拟研究了激光非均匀性对高收缩比球内爆内界面变形的影响。2 维数值模拟计算表明: 直接驱动高收缩比内爆对驱动激光非均匀性非常敏感, 内界面流体不稳定性的发展严重破坏靶丸的对称压缩, 使中心热斑的体积显著减小。以最大压缩时扰动增长幅度不超过热斑半径的 1/3 为限, 模拟给出不同模数的低阶扰动模(模数小于等于 12)对驱动激光均匀性的要求在 2.5% ~ 0.25% 之间, 其中模数在 8 ~ 10 之间的扰动模对激光功率均匀性的要求最严格, 约为 0.25%。

**关键词:** 惯性约束聚变; 流体不稳定性; 收缩比; 非均匀性; 数值模拟

**中图分类号:** O361.5; O242.1 **文献标识码:** A

流体力学不稳定性是影响惯性约束聚变(ICF)内爆压缩和点火燃烧的关键因素之一<sup>[1]</sup>。为了减少点火需要的能量, 降低驱动激光器的造价, ICF 通常采用高收缩比和高形状因子的靶丸结构设计, 实行整形预脉冲的接近等熵的压缩, 高收缩比、高形状因子和整形预脉冲驱动, 都会导致内爆中流体不稳定性的较大发展。首先是烧蚀 Rayleigh-Taylor (R-T) 不稳定性的增长阻止内爆速度的提高, 进而增大驱动能量要求; 而减速阶段流体不稳定性的增长, 会破坏对称压缩, 减小热斑体积, 直接破坏点火热斑的形成, 对点火构成威胁; 另外, 球收缩几何效应<sup>[2]</sup> (又称 B-P 效应), 也会放大内界面扰动。驱动源的非均匀性会破坏内爆过程中靶丸的对称压缩<sup>[1,3]</sup>, 尤其是高收缩比内爆对激光驱动的非均匀性非常敏感。对于直接驱动, 这些非均匀性产生扭曲的冲击波, 其波后留下密度扰动, 成为随后的 R-T 不稳定性扰动源, 在加速和减速阶段, 流体不稳定性的快速发展会严重破坏靶丸的对称压缩, 使得中心热斑的温度和体积显著减小, 进而影响点火。本文将使用 LARED-S 程序, 参照 NIF 直接驱动 DT 点火靶(收缩比近 30), 模拟分析驱动激光功率的非均匀性(主要研究低阶模扰动)对高收缩比球内爆内界面变形的影响, 给出了近似物理模型下 NIF 直接驱动 DT 点火靶不同扰动模对驱动激光非均匀性的要求。

## 1 物理方程组

采用理想气体状态方程, 全电离和单温近似。给出 2 维球几何中数值模拟的物理方程组。

### 1.1 质量、动量和能量方程(可压, 无粘单温流体模型)

$$\frac{\partial}{\partial t} = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u) - \frac{1}{r \sin} \frac{\partial}{\partial} (v \sin) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho u^2) - \frac{1}{r \sin} \frac{\partial}{\partial} (\rho u v \sin) - \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{v^2}{r} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho uv) - \frac{1}{r \sin} \frac{\partial}{\partial} (\rho v^2 \sin) - \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial} - \frac{uv}{r} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = -\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \rho e u) - \frac{1}{r \sin} \frac{\partial}{\partial} (\rho v \sin) - p \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 u) + \frac{1}{r \sin} \frac{\partial}{\partial} (v \sin) \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 k_{e0} T^{5/2} \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r \sin} \frac{\partial}{\partial} (\frac{1}{r} k_{o} T^{5/2} \frac{\partial T}{\partial} \sin) + W_{laser} \quad (4)$$

式中:  $\rho$  为密度;  $u, v$  分别为  $r, \theta$  方向的速度;  $p$  为压强;  $e = c_v T$  为比内能;  $T$  为温度;  $c_v$  为定容比热容;  $k_{e0}$  和  $k_o$  分别为  $r$  和  $\theta$  方向的电子热传导系数;  $W_{laser}$  为激光源项。

### 1.2 激光吸收(采用正入射近似)

$$\frac{d i}{d r} = K_i, \quad \frac{d r}{d r} = -K_r, \quad = r^2 I, \quad W_{laser} = \frac{1}{r^2} \frac{d}{d r} (i - r) + W_{res} \quad (5)$$

\* 收稿日期: 2007-01-26; 修订日期: 2007-06-05

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题; 国家自然科学基金资助课题(10475011, 10225105)

作者简介: 郁晓瑾(1981—), 女, 硕士, 主要从事惯性约束聚变中流体不稳定性研究; yuxiaojin2001@163.com。

式中： $I$ 为激光强度；下标“i”表示入射激光，“r”表示反射激光； $K$ 为激光逆韧致吸收系数； $W_{laser}$ 为激光吸收能量，包括逆韧致吸收和共振吸收； $W_{res}$ 为激光共振吸收能量。

LARED-S 程序<sup>[4]</sup>对物理方程组使用分裂算法，分成流体、热传导和激光吸收 3 部分。流体部分采用有限体积法对流体方程组进行离散，使用 2 阶精度 FCT(非线性反扩散方法)算法；热传导部分采用局部 1 维隐式追赶迭代算法。

### 2 点火靶和驱动激光源

参照 NIF 直接驱动 DT 点火靶<sup>[5]</sup>，为避免多介质计算问题，选用单介质全 DT 靶，把原来 NIF 靶 1~2 μm 的 CH 烧蚀层改成 10 μm 的 DT 冰烧蚀层，靶半径 1 700 μm，DT 冰厚度 340 μm，DT 冰温度为 19 K，密度为 0.258 g/cm<sup>3</sup>；DT 气的密度 0.3 mg/cm<sup>3</sup>。模拟中取激光波长 0.351 μm，激光总能量 1.5 MJ，预脉冲长 5 ns，强度为 10 TW，最后主脉冲的强度达到 450 TW。图 1 和图 2 给出了模拟使用的 DT 靶结构和激光脉冲形状。

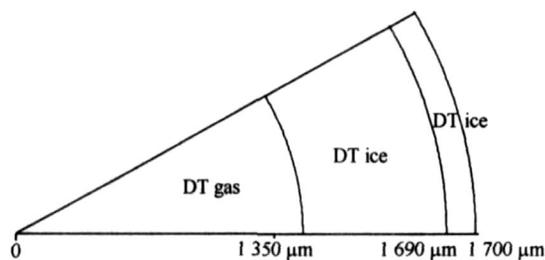


Fig. 1 Schematic of all-DT direct-drive ignition target design  
图 1 全 DT 直接驱动点火靶结构

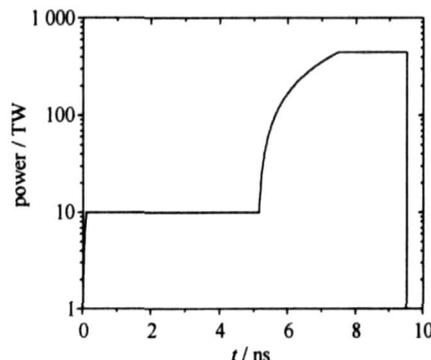


Fig. 2 Pulse shape for direct-drive ignition target  
图 2 直接驱动点火靶激光脉冲形状

### 3 数值模拟结果及分析

使用 LARED-S 程序，对激光驱动功率的空间分布加不同模数不同幅度的单模扰动，进行内爆压缩阶段(不考虑点火)内界面流体变形数值模拟研究。在 2 维数值模拟中，为分析方便，假设靶丸表面激光功率的非均匀性为余弦分布，分别考虑各个非均匀低价扰动模对直接驱动内爆过程的影响。

数值模拟结果显示，高收缩比内爆对激光驱动非均匀性非常敏感。如图 3 所示，对激光驱动功率扰动幅度分别为 0.2%、0.3%、0.5% 和 1.0% (模数  $L=4$ ) 的情况进行数值模拟，给出内爆压缩达到最大时刻的密度和温度分布图。由图 3 可以看出，当扰动幅度小于 0.3% 时，靶丸的形状接近球形，中心热斑近似 1 维结果；当扰动幅度大于 1.0% 时，流体不稳定性的发展严重破坏靶丸的对称压缩，中心热斑的温度和体积显著地减小。由

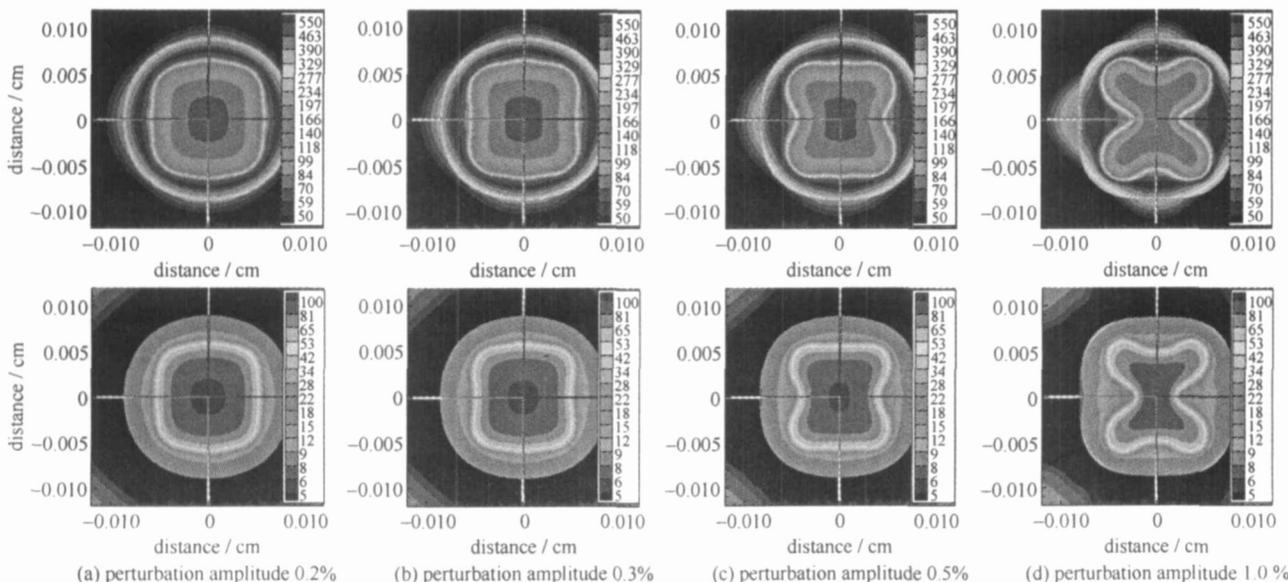


Fig. 3 Contour graphs of density(first row) and temperature(second row) about the time of optimal compression for different perturbation  
图 3 不同扰动幅度情况下最大压缩时的密度(第 1 行)和温度(第 2 行)分布图

此可见,对于该条件下的高收缩比内爆,驱动源的低阶模不对称性要求小于  $0.3\% \sim 0.5\%$ 。

### 3.1 极轴(横轴)处和赤道(竖轴)处扰动增长的区别

比较图 3 中旋转对称轴(极轴)处和赤道处尖顶的长度和形状,可以发现,极轴处的尖顶较长而窄;而远离旋转轴的赤道处的尖顶则较短而宽。在 2 维球几何中,由于不稳定性在不同位置处的发展空间是不对称的,因此不同位置处尖顶和气泡的发展是不对称的。对于同样的角度间隔,靠近旋转对称轴处的扰动增长是 3 维的,因此扰动增长较快,尖顶的长度比较长,宽度比较窄;而远离旋转轴的赤道附近扰动是旋转对称的,其增长接近 2 维情况,所以扰动增长(和极轴附近的扰动增长比)比较慢。造成这种差异的原因来自 2 维轴对称模拟的局限性,2 维轴对称球内爆中,尖顶(或气泡)呈环状结构,不符合实际状况,而实际的球内爆扰动是 3 维的,需要进行 3 维模拟。

### 3.2 预脉冲和主脉冲的非均匀性对靶丸内爆对称性影响的差异

驱动源包括预脉冲和主脉冲,预脉冲持续时间长,但占总能量的份额却很少,而主脉冲持续时间短,占总能量的份额却很高。我们分 3 种情况进行数值模拟研究:预脉冲和主脉冲都非均匀;预脉冲非均匀,主脉冲均匀;预脉冲均匀,主脉冲非均匀。图 4 给出了 3 种不同情况压缩达到最大时的密度分布图,非均匀驱动功率的扰动幅度为  $0.3\%$ ,模数  $L = 8$ 。

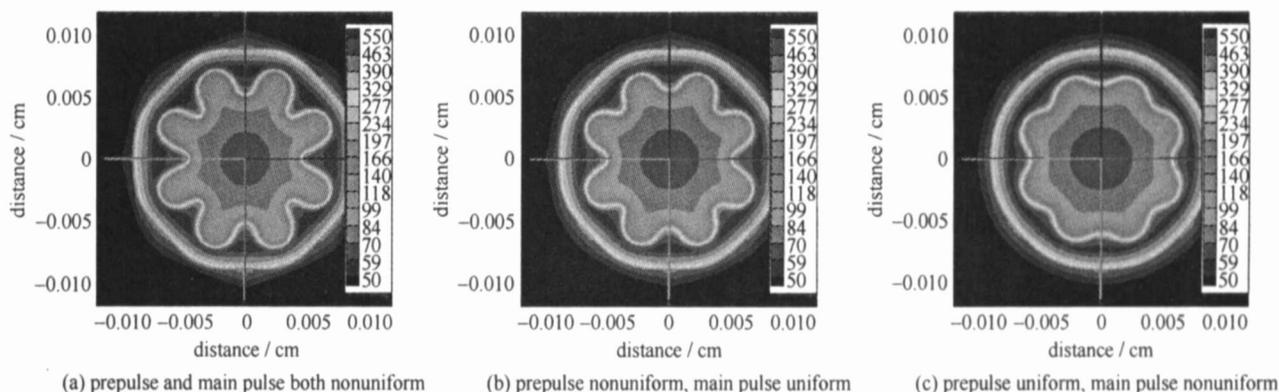


Fig. 4 Effect of prepulse and main pulse nonuniform on symmetry of implosion

图 4 预脉冲和主脉冲非均匀对内爆对称性的影响

通过比较图 4 中靶丸的形状和内界面尖顶的长度,可以看出图 4(a)的尖顶长度最长,对称性最差,图 4(b)的尖顶也比较长,对称性也较差,图 4(c)的尖顶长度最短,对称性略好。因此可得到结论:持续时间较长的低功率预脉冲的非均匀烧蚀压缩使靶丸产生了更大的非均匀性,在主脉冲向心内爆加速阶段,加重破坏靶丸的对称性。分析其原因如下:预脉冲时间很长,开始加的非均匀性产生扭曲的冲击波,其波后留下密度扰动,经过紧跟其后的几次冲击波后,已有较大的 Richtmyer-Meshkov (R-M) 不稳定性增长,因此也更容易耦合到内界面,在内界面形成较大的初始扰动,且预脉冲功率密度低,期间烧蚀致稳作用很弱,长时间的低功率驱动不均匀性明显增大内外界面低阶模扰动幅度,对形成点火热斑不利;相反,主脉冲时间较短,功率密度高,烧蚀致稳作用强,扰动增长比较缓慢。因此,在 ICF 中控制预脉冲的非均匀性是减小内界面流体不稳定性的重要因素。

### 3.3 不同模数的低阶模对激光均匀性的要求

由于极轴处的扰动增长接近实际 3 维情况,取压缩达到最大时极轴处的扰动增长幅度达到热斑半径的  $1/3$  为限,考察不同模数的低阶模对激光功率均匀性的要求,得到的数据如图 5 所示。可以看出:低阶模情况(模数  $L = 12$ ),不同扰动模对驱动激光均匀性的要求在  $2.5\% \sim 0.25\%$  之间,其中模数  $L$  在  $8 \sim 10$  之间的扰动模对激光功率均匀性的要求最高,其对应的扰动波长增长很快,严重破坏靶丸的对称压缩,若要求最大压缩时扰动增长幅度不超过热斑半径的  $1/3$ ,则要求初始激光功率非均匀小于等于  $0.25\%$ 。目前计算没有考虑韧致辐射以及内爆压缩后期中心热斑的热核反应产生的  $\alpha$  粒子加热的影响,考虑这两种效应后,内界面烧蚀致稳会有所增大,因此对激光非均匀的要求要有所放宽,但我们目前的结果与文献[6]给出靶面的辐照不均匀度应控制在  $1\%$  以下基本一致。对于模数  $L = 12$  的扰动模,虽然其在内爆压缩阶段的前期增长很快,但到后期,当扰动增长达到一定幅度后,就会被完全致稳,进入饱和状态,扰动增长变慢。因为在 ICF 内爆压缩后期,由于球几何的收缩效应明显,扰动波长越来越短,模数越高,波长越短,中心热斑温度升高,电子热传导对短波长扰动的致稳作用明显。

## 4 结 论

本文在全电离、单温近似、理想气体状态方程和忽略韧致辐射损失这种较简单的物理模型下,以 NIF 直接驱动 DT 点火靶为参考模型,使用 LARED-S 程序,主要研究了高收缩比情况下直接驱动激光非均匀性对球内爆内界面变形的影响。模拟结果表明,高收缩比内爆对激光驱动非均匀性非常敏感,内界面流体不稳定性的发展严重破坏靶丸的对称压缩,使得中心热斑体积显著减小,热斑温度降低,取压缩最大时极轴处的扰动增长幅度达到热斑半径的  $1/3$  为限,模拟给出低阶模情况下(模数  $L < 12$ ),不同扰动模对驱动激光均匀性的要求在  $2.5\% \sim 0.25\%$  之间,其中模数  $L$  在  $8 \sim 10$  之间的扰动模对激光功率均匀性的要求最为严格,约为  $0.25\%$ 。

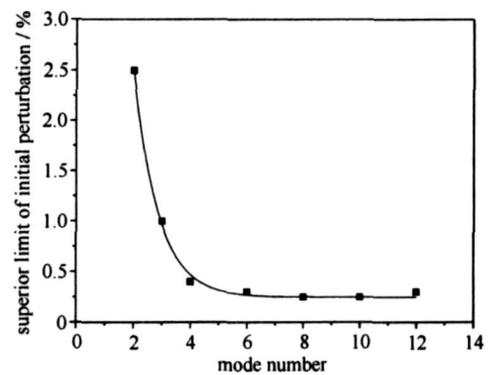


Fig. 5 Fitted curve of requirements for laser uniformity for different mode number  
图 5 不同模数的扰动模对初始激光均匀性要求的拟合曲线

## 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**: 339-491.
- [2] Plesset M. On the stability of fluid flows with spherical symmetry[J]. *J Appl Phys*, 1954, **25**: 96-98.
- [3] 张钧, 常铁强. 激光核聚变靶物理基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. (Zhang J, Chang T Q. Fundament of the target physics for laser fusion. Beijing: National Defence Industry Press, 2004)
- [4] 吴俊峰, 叶文华, 张维岩. 直接驱动柱内爆流体不稳定数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(3): 373-376. (Wu J F, Ye W H, Zhang W Y. Numerical simulation of hydrodynamic instability in direct-drive cylindrical implosion. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(3): 373-376)
- [5] McCrory R L, Bahr R E, Betti R, et al. OMEGA ICF experiments and preparation for direct drive ignition on NIF[J]. *Nucl Fusion*, 2001, **41**: 1413-1422.
- [6] McCrory R L, Verdon C P. In inertial confinement fusion[C]// Editrice Compositori. 1989: 83-124.
- [7] 郁晓瑾, 叶文华, 吴俊峰. 直接驱动球内爆点火的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2006, **18**(8): 1297-1301. (Yu X J, Ye W H, Wu J F. Numerical simulation of direct-drive ICF ignition in spherical geometry. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(8): 1297-1301)
- [8] 王继海. 二维非常流和激波[M]. 北京: 科学出版社, 1994. (Wang J H. Two-dimensional unsteady flow and shock waves. Beijing: Science Press, 1994)

## Numerical simulation of effect of laser nonuniformity on interior interface

YU Xiao-jin, WU Jur-feng, YE Wen-hua

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China)

**Abstract:** Using the LARED-S code and referring to the NIF direct-drive DT ignition target, the effect of laser nonuniformity on the interior interface in direct-drive spherical implosion with high convergence ratio was numerically studied. The two-dimensional results show that the implosion with high convergence ratio is sensitive to the nonuniformity of driving laser, and the growth of hydrodynamic instability on interior interface destroys the symmetric-drive and reduces the volume of central hot spot observably. Taking the limit that perturbation amplitude is equal to  $1/3$  radius of central hot spot, the simulation also gives that the requirements for the laser uniformity for different mode number (less than 12) on simple physical model are between  $2.5\% \sim 0.25\%$ , and the modes between  $8 \sim 10$  have the most rigorous requirement which is about  $0.25\%$ .

**Key words:** ICF; Hydrodynamic instability; Convergence ratio; Nonuniformity; Numerical simulation