

神光 II 与神光 III 原型上的辐射驱动 小收缩比内爆靶设计*

江少恩[†] 缪文勇 况龙钰

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2010 年 1 月 29 日收到; 2010 年 7 月 23 日收到修改稿)

本文建立辐射驱动小收缩比(5 至 10 倍)的内爆靶丸的设计方法, 并利用辐射流体力学程序 Multi-1d 对神光 II 和神光 III 原型装置的辐射驱动小收缩比内爆靶丸进行模拟计算, 设计出小收缩比内爆靶丸的构形, 计算结果给出压缩比、中子产额、压缩面密度随燃料压力变化等内爆物理参量. 神光 II 装置上的内爆靶燃料分别采用 DD 气体和 DT 气体两种; 神光 III 原型装置的内爆靶燃料采用 DD 气体. 神光 II 上小收缩比内爆实验结果与模拟结果基本一致, 表明 Multi-1d 用于设计此类实验的可靠性.

关键词: 辐射驱动, 小收缩比, 内爆, 面密度

PACS: 52.57.-z, 52.65.-y

1. 引言

惯性约束聚变(ICF)是利用驱动源驱动聚变靶丸内爆,使氘氚(DT)热核燃料达到很高密度(例如每立方厘米几百克)和局部达到很高的温度(例如 5—10 keV),产生热核反应点火,在惯性约束状态下自持地燃烧下去,达到高的燃耗,释放出热核能量^[1].内爆是惯性约束聚变的关键过程,内爆动力学研究的目的是为热核反应创造条件,即高温和高密度.辐射驱动内爆的物理过程首先是将激光注入高 Z 材料黑腔,激光在高 Z 黑腔内壁产生 X 射线,并通过腔壁的吸收和再发射在腔内形成 X 射线辐射场;在黑腔产生的辐射场作用下,置于黑腔中心的靶球壳层材料被烧蚀,产生烧蚀冲击波,推动燃料向靶芯聚集、压缩,使得燃料达到高温和高密度压缩状态而发生热核聚变.

内爆中子产额和内爆收缩比是内爆研究重要的内容,中子产额的高低、氘氚压缩程度的高低,有二维因素的影响,还有流体力学不稳定性和“混合”的影响^[2].特别是“混合”因素非常复杂.小收缩比内爆的主要特点是“二维影响”和“混合影

响”均比较小.其实验结果应该与一维数值模拟结果更接近,甚至基本符合.因此小收缩比实验结果可用来校核一维模拟程序^[3].一维程序简单,是二维程序的基础,是点火靶设计的主要程序.一维程序有不同的近似描述,单温、三温、多群输运等,格式、方法等也有近似,有些处理方法更需要实验的验证.

有鉴于此,在神光 II 和神光 III 原型装置上^[4],将要开展小收缩比内爆实验研究,且在神光 II 装置上进行了少量的小收缩比内爆实验用于探索此类实验的可行性,因此需要对小收缩比的内爆靶丸进行仔细地设计.

本文采用一维辐射流体力学程序 Multi-1d 来研究辐射驱动小收缩比内爆靶的内爆参数随靶丸燃料压力的变化^[3].Multi-1d 程序是平面一维辐射流体力学程序,它用于解决拉格朗日动力学和多群辐射扩散传播问题,它包括能流受限的电子热传导和表列物态方程,以及非局域热力学平衡原子物理过程.Multi-1d 程序可以将辐射场与流体动力学运动很强烈地耦合在一起,用来求解耦合到辐射输运方程中的一维平面(柱对称、球对称)流体力学方程,在辐射输运方程中采用多群方法处理.

* 国家高技术研究发展计划,国家自然科学基金(批准号:10775120)资助的课题.

[†] E-mail: jiangshn@vip.sina.com

2. 一些内爆参数的定义

小收缩比在实验设计上是通过靶球高初始气压来实现的, 所以通过改变气压来改变内爆压缩比. 为了更清楚地说明问题, 需要介绍一些定义.

收缩比 C_r 的定义为: 燃料初始半径与压缩最小的半径之比, $C_r = R_0/R_f$, 其中 R_0 和 R_f 分别为聚变燃料(DD 或 DT) 初始半径和压缩停滞时的最小半径. 通常, 高收缩比 C_r 一般为 20 以上, 例如, NIF 的点火靶, 收缩比 C_r 为 36. 中等收缩比一般为 10—20, 例如 Nova 激光器^[1] 和神光 II 装置上的压缩内爆^[5]. 小收缩比通常在 10 以下.

小收缩比内爆实验主要诊断量是中子产额, 通过实验测得中子产额数据的分散度及与一维数值模拟的比对, 来判断所获结果可否作为一维内爆基准.

3. 内爆靶球结构设计原则

辐射驱动的聚变靶球大小与两个因素有关: 黑腔尺寸和辐射温度.

首先, 黑腔和靶丸大小的比例影响均匀性和对称性, 从而决定靶球大小. 如果黑腔半径比靶球的半径大得多, 除了最长的波长扰动以外, 黑腔在辐射场的平滑方面十分有效. 为了保证对靶球的驱动有足够的均匀性和对称性, 一般应使靶球的半径保持在小于黑腔半径的三分之一以内. 黑腔半径 R_H 确定之后, 靶球的最大尺寸 R_C 也就确定了. 其中 R_0 为燃料半径, ΔR 为球壳的厚度, $R_C = R_0 + \Delta R$ 为靶球的外半径. 如果以球形腔作为黑腔, 辐射场分布将有解析结果. 那么以球腔为例(见图 1), 来说明对称性问题. 对于黑腔内部一个阶数为 l 的 Legendre 多项式形式的微扰, 其在靶丸表面引起的微扰表示成 R_H/R_C 的函数如图 2 所示^[1]. 辐照在靶丸辐射场通常用 Legendre 多项式展开形式来表示, 图 2 中的 P_2, P_3, P_4, P_6 等为 Legendre 多项式的展开系数, 理想情况下, 只有 P_0 项, 但因各种原因, 难以做到, 总含有一定高阶项. 如果腔半径大约 3 到 4 倍于靶丸半径, 除了 P_2 成分外的所有微扰模式的幅度光滑了约两个量级. 当 $R_H/R_C = 5, P_4$ 趋于零. 如果适当选择靶丸使其在内爆中接近这样一个值的话, 就能够实现非常小的 P_4 平均微扰幅度. 在美国 Omega 激

光装置上, 采用过球形黑腔来驱动靶丸, 半径比 $R_H/R_C = 1400 \mu\text{m}/275 \mu\text{m} = 5.1$, 与 5 十分接近, 靶丸压缩的对称性很好^[6]. 对于非球形腔, 情况会复杂一些, 但是趋势相似^[7]. 在 Nova 激光装置(10 束光) 上, 通常半径比 $R_H/R_C = 800 \mu\text{m}/265 \mu\text{m} = 3$, 在神光 II 激光装置(8 束光) 上的半径比一般为 3, 对于 192 束的 NIF 和 240 束的 LMJ 装置^[8], 半径比为 2.5, 它小于 Nova 上的半径比, 是由于 NIF 和 LMJ 的激光束更多, 可以产生更对称的辐射场, 因此其半径比可以稍小. 对于只有八路的神光 II 和原型, 小收缩靶要求半径比应 > 3 .

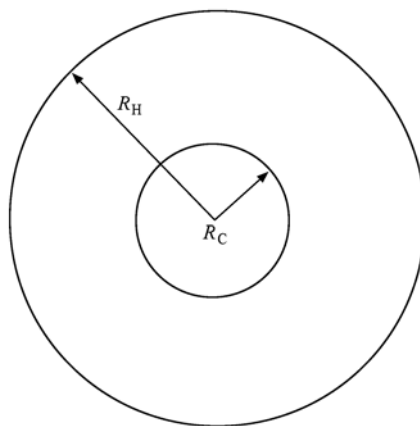


图 1 球腔驱动内爆

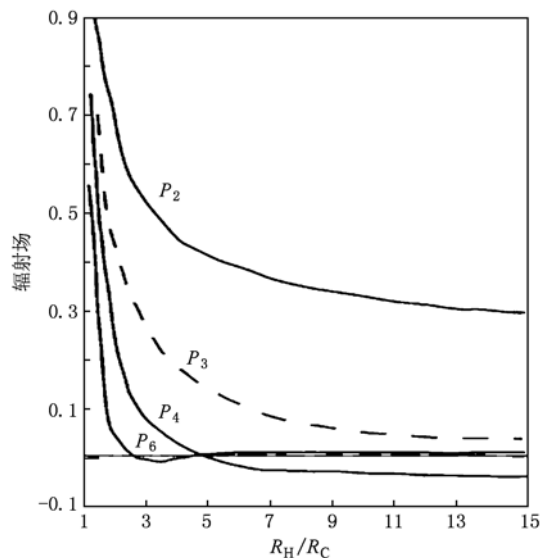


图 2 在靶丸上观测到的辐射场的分布

其次, 辐射温度(峰值温度和脉冲宽度) 决定烧蚀层厚度: 峰值温度决定了驱动压力和靶球烧蚀层的平均速度, 在脉冲宽度的时间内驱动烧蚀层, 于

是确定烧蚀层的厚度 ΔR . 对于 CH 材料, 辐射烧蚀压和烧蚀速率分别为^[2]

$$P_a (\text{Mbar}) = 6.6 T_r^{3.3}, \quad (1)$$

式中, T_r 单位为 eV.

$$\dot{m} (\text{g/cm}^2\text{s}) = 3 \times 10^5 T_r^3. \quad (2)$$

ICF 靶球内爆可用火箭效率方程描述:

$$\eta_h = x \ln^2 x / (1 - x), \quad (3)$$

式中, x 为靶球最终壳层质量 m_f 和初始质量 m_i 之比即 $x = M_f/M_i$. 图 3 给出了火箭效率随 $x = M_f/M_i$ 的变化, 其重要结论是峰值在 x 大约为 20% 的地方, 也就是为了实现优化驱动, 大约 80% 的壳层要被烧蚀掉. 辐射温度决定了蚀烧速率, 结合持续时间也就决定了烧蚀层的厚度 (烧掉 80%), 于是由 (2) 式和图 3 可以确定球壳厚度为

$$x_0 = \int \dot{m} dt / \rho_0 = 3 \times 10^5 \int [T_r(t)]^3 dt / \rho_0. \quad (4)$$

其中 $T_r(t)$ 为随时间变化的辐射温度, ρ_0 为球壳的初始密度. 壳层厚度

$$\Delta R = 1.25 x_0 = 3.75 \times 10^5 \int [T_r(t)]^3 dt / \rho_0. \quad (5)$$

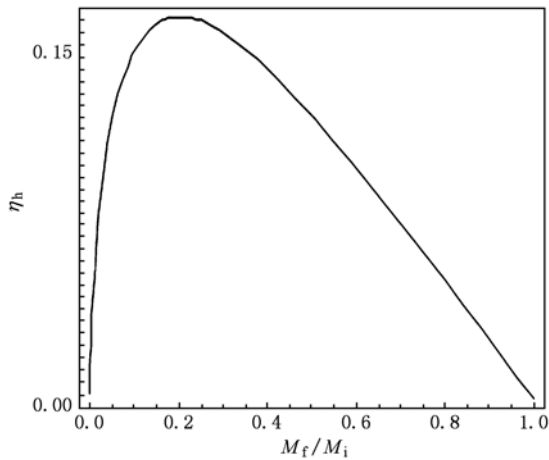


图 3 火箭效率随 $x = M_f/M_i$ 变化曲线

鉴于内爆压缩过程的复杂性, 内爆压缩的关键参量如收缩比 C_r 、燃料面密度 $\langle \rho_r \rangle$ 以及中子产额等不能通过解析公式或定标关系得到, 必须采用数值模拟方法获得, 本文采用一维辐射流体动力学程序 Multi-1d 进行数值模拟计算.

4. 神光 II 的小收缩比靶设计

神光 II 激光装置上采用的黑腔尺寸通常为

$\phi 700 \mu\text{m}$ (直径) $\times L 1400 \mu\text{m}$ (长度), 黑腔和靶丸的结构示意图见图 4, 腔靶一般采用两端开激光注入孔的圆柱体, 腔的轴向沿南北方向. 8 束激光分成两组南北各 4 束, 南北 4 束激光为夹角 45° 的四棱锥结构, 同时分别穿过两个 $\phi 380 \mu\text{m}$ 小孔, 将总 2000J 三倍频激光注入黑腔靶. 得到的辐射温度曲线见图 5. 在神光 II 装置上, 设计了两种小收缩比内爆靶, 分别为 DD 燃料和 DT 燃料.

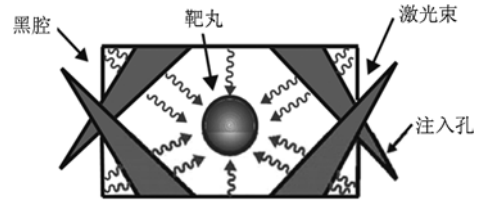


图 4 激光间接驱动的黑腔与靶丸结构示意图

4.1. 神光 II 的小收缩比靶设计——DD 燃料

已知神光 II 上内爆黑腔的半径为 $R_H = 350 \mu\text{m}$, 那么靶丸大小应 $\leq 350/3 = 116 \mu\text{m}$, 可取 $R_C = 114 \mu\text{m}$. 由图 5 辐射温度曲线^[9], 利用 (5) 式确定烧蚀层的厚度 $14 \mu\text{m}$, 从而确定 DD 燃料半径 $R_0 = 100 \mu\text{m}$, CH 壳厚 $\Delta R = 14 \mu\text{m}$.

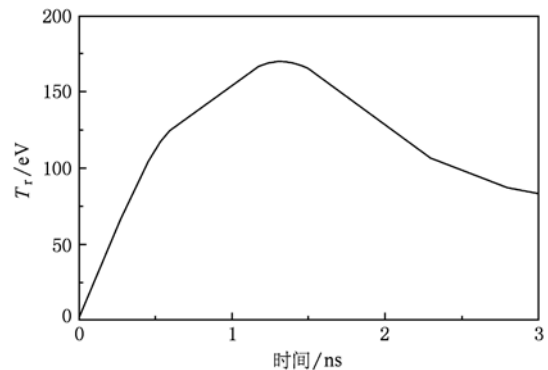


图 5 神光 II 激光装置上的辐射温度曲线

采用 Multi-1d 程序研究内爆参数随 DD 压力的变化, DD 气压在 60 atm 与 200 atm 之间变化. 得到的结果见表 1 (表中面密度单位为 g/cm^2 , 下同) 和图 6. 由表 1 和图 6 可以得到, 在 DD 压力 60—200 atm ($1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$) 变化时, 面密度的变化 $\langle \rho_r \rangle$: 8.73—9.93 mg/cm^2 ; 收缩比 C_r : 9.8—6.1; 中子产额 Y_n : 3.6×10^6 — 3.5×10^5 . 另外得到一个有

趣的现象,即 DD 压力大幅度增加时, C_r 和 Y_n 都大幅度下降,而面密度变化不大(小于 13%). 由于在高压时,中子产额太少,测量系统不确定度大,所以在高压时,靶丸可以考虑充 DT 气体燃料.

表 1 神光 II 内爆参数随 DD 压力变化

气压	面密度	C_r	$Y_n/10^6$
60	0.00873	9.7836	3.6097
70	0.00884	9.1888	2.914
80	0.00892	8.7031	2.3878
90	0.00898	8.3053	1.9713
100	0.00902	7.9598	1.6491
110	0.00905	7.6613	1.3918
120	0.00908	7.402	1.1813
130	0.00911	7.175	1.005
140	0.00917	6.9756	0.859
150	0.00924	6.7965	0.739
160	0.00934	6.6348	0.634
170	0.00945	6.4789	0.553
180	0.0096	6.3417	0.476
190	0.00975	6.2126	0.4112
200	0.00993	6.094	0.3528

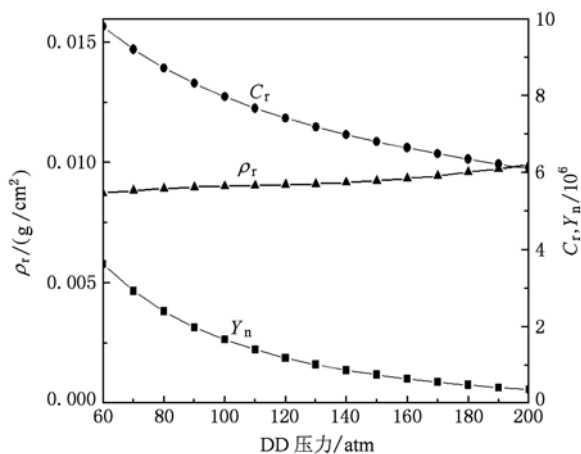


图 6 神光 II 的内爆参数随 DD 压力的变化

4.2. 神光 II 的小收缩比靶设计——DT 燃料

神光 II 上的高气压 DT 内爆靶考虑结构为: DT + SiO₂ + CH. 之所以壳层采用 SiO₂ 和 CH 两层, SiO₂ 的保气性能更好,而 DT 有一定的放射性,这样

的壳层结构有利于保气,以防 DT 漏失.

与 DD 类似,DT 燃料的半径 $R_0 = 100 \mu\text{m}$, 烧蚀壳层厚度: SiO₂ (2 μm) + CH (10 μm), DT 压力: 10—200 atm. 利用 Multi-1d 的计算结果见表 2 和图 7. 表 2 和图 7 中均从 10 atm 开始计算,主要为了说明面密度随 DT 压力基本不变(变化小于 12%),小收缩比的压力是从 60 atm 开始,即压缩比小于 10. 由表 2 和图 7 可以看出,在 DT 压力 60—200 atm 变化时,面密度的变化 $\langle \rho_r \rangle$: 10.42—11.93 mg/cm²; 收缩比 C_r : 9.6—5.8; 中子产额 Y_n : 1.93×10^8 — 9.155×10^6 .

表 2 神光 II 内爆参数随 DT 压力变化

气压	面密度	C_r	$Y_n/10^7$
10	0.01	22	67.66
20	0.0101	15.91	67.97
30	0.01015	13.096	49.94
40	0.01024	11.5	38.30
50	0.0103	10.396	27.57
60	0.01042	9.6062	19.30
80	0.0106	8.4946	9.892
100	0.01063	7.7282	5.883
120	0.01066	7.157	3.779
150	0.01081	6.5329	2.093
180	0.01151	6.0577	1.249
200	0.01193	5.7927	0.9155

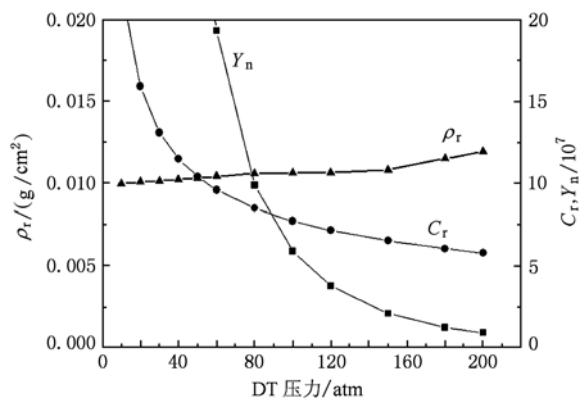


图 7 神光 II 的内爆参数随 DT 变化

4.3. 神光 II 的小收缩比 DT 燃料内爆实验

为了研究球一维对称内爆的可行性,在神光 II

激光装置上开展小收缩比内爆探索实验. 采用的内爆靶球结构为上面所设计的靶丸即:DT 燃料的半径 $R_0 = 100 \mu\text{m}$, 烧蚀壳层厚度: $\text{SiO}_2(2 \mu\text{m}) + \text{CH}(10 \mu\text{m})$, DT 压力: 80—150 atm. 为保持内爆有较好的对称性, 尽量减少黑腔壁开孔个数, 因此, 黑腔只在柱腔两端开有激光注入孔, 而在柱腔侧壁没有开诊断孔, 所以实验测量仅仅测量了中子产额. 实验结果见图 8, 为了作比较, 将图 7 的模拟结果也绘制图 8 中, 可以看出, 当 DT 气压力大于 120 atm 时, 模拟与实验的结果基本一致, 但是, 当 DT 气压力降至 80 atm 时, 两者相差较大, 模拟结果比实验结果高约一倍, 此时半径压缩比 C_r 更大, 靶丸压缩变形更大, 二维效应更强, 不是理想的球对称压缩, 从而造成实验测量的中子产额比模拟结果低. 由此说明, 为了得到好的球一维对称压缩, DT 气的压力应大于 120 atm, 对应的 C_r 应小于 7. 表征内爆对称性好坏的另一个量为 YOC, 称为实验中子产额与干净一维计算的中子产额比, 当对称性较好时, YOC 接近于 1, 对称性越差, YOC 就更小. 由于收缩比很小时, 对称性一般较好, 故 YOC 接近于 1. 利用图 7 和图 8, 可以得到图 9, 即 YOC 随 C_r 的变化图, 由图看出, 当 $C_r < 7$ 时, $\text{YOC} > 0.8$. 美国的 Omega 激光器上直接和间接驱动实验中得到了类似的结果^[10,11].

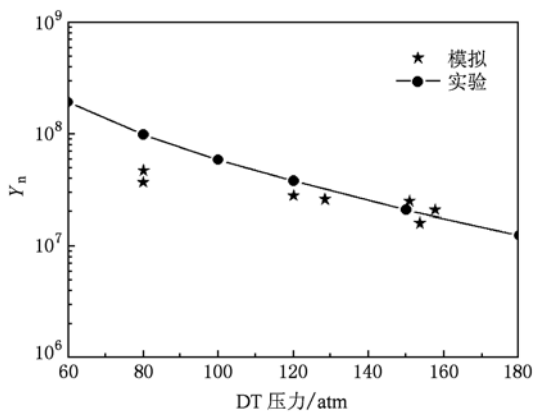


图 8 神光 II 上中子产额随 DT 压力的关系

5. 神光 III 原型小收缩比靶的设计

神光 III 原型装置既是神光 III 主机的工程样机, 又是用于惯性约束聚变 (ICF) 实验研究的大型伽玛玻璃固体激光装置, 其输出能力为: 8 束, $0.35 \mu\text{m}/(10 \text{ kJ}\cdot\text{ns})$ 以及 $0.35 \mu\text{m}/(15 \text{ kJ}\cdot 3 \text{ ns})$ (长脉冲); 并且

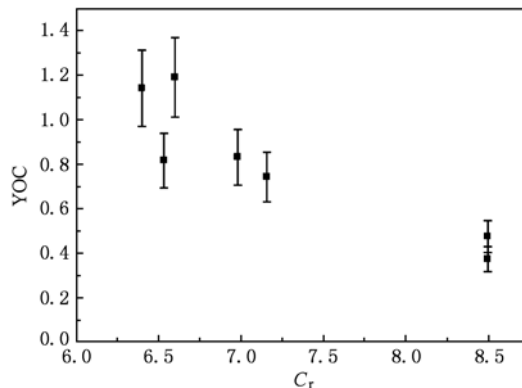


图 9 YOC 随半径压缩比的变化

具备初步的脉冲时间波形整形能力. 8 束激光排布注入方式与神光 II 装置类似.

神光 III 原型激光装置上采用间接驱动内爆靶结构见图 4. 神光 III 原型的黑腔尺寸通常为 $\phi 1000 \mu\text{m}$ (直径) $\times L 1700 \mu\text{m}$ (长度), 得到的辐射温度曲线见图 10^[12,13]. 在神光 III 原型装置上, 设计了一种小收缩比内爆靶, 靶球充 DD 燃料.

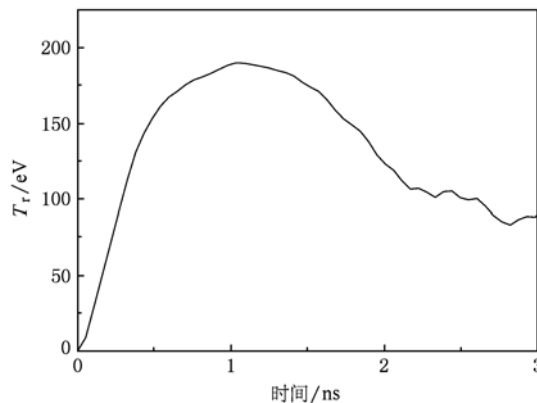


图 10 神光 III 原型装置上的辐射温度曲线

已知神光 III 原型内爆黑腔的半径为 $R_H = 500 \mu\text{m}$, 那么靶丸的大小应 $\leq 500/3 = 166 \mu\text{m}$, 取为 $R_C = 163 \mu\text{m}$. 由辐射温度 (见图 10) 并利用 (5) 式确定 CH 烧蚀壳层的厚度 $\Delta R = 18 \mu\text{m}$, 从而可以得到 DD 燃料半径 $R_0 = 145 \mu\text{m}$.

对于神光 III 原型的辐射驱动小收缩比内爆, 利用 Multi-1d 的计算结果见表 3 和图 11. 表 3 和图 11 中均从 50 atm 开始计算, 其压缩比小于 10. 由表 3 和图 10 可以看出, 在 DT 压力 50—200 atm 变化时, 收缩比 C_r : 9.2—5.0; 中子产额 Y_n : 1.15×10^8 — 9.1

$\times 10^6$; 面密度的变化 $\langle \rho_r \rangle$: 9.75—10.6 mg/cm², 面密度变化不大.

表3 神光Ⅲ原型内爆参数随 DD 压力变化

气压/atm	面密度	C_r	$Y_n/10^7$
50	0.00975	9.1776	11.45
60	0.00963	8.3608	9.29
70	0.00952	7.747	7.545
80	0.00945	7.285	6.157
90	0.00946	6.9235	5.06
100	0.00954	6.6267	4.22
110	0.00971	6.3769	3.549
120	0.0099	6.1607	3.0043
130	0.01006	5.9695	2.54
140	0.0102	5.796	2.17
150	0.01031	5.6354	1.86
160	0.0104	5.488	1.597
170	0.01047	5.3508	1.38
180	0.01053	5.2252	1.1975
190	0.01057	5.1085	1.0366
200	0.0106	4.9969	0.9095

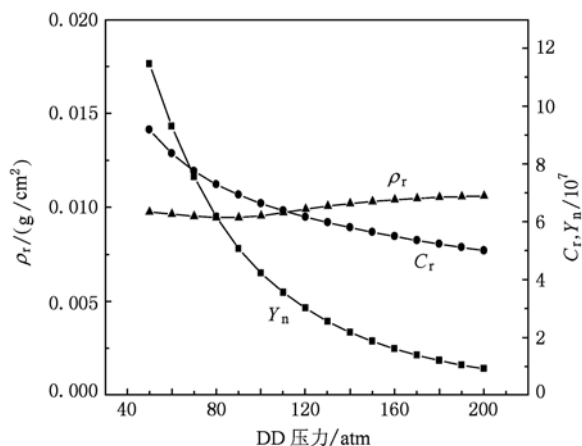


图11 神光Ⅲ原型的内爆参数随 DD 变化

6. 结 论

总结全文得到的结论为:1) 确定了小收缩比的设计原则(腔决定靶球尺寸、辐射温度确定烧蚀层厚度). 2) 采用 Multi-1d 程序, 设计了神光Ⅱ和神光Ⅲ原型辐射驱动的小收缩比内爆靶结构. 3) 研究了小收缩比内爆靶的定标关系: 中子产额和收缩比随燃料压力增大而降低. 4) 发现了新的定标关系: 面密度 $\langle \rho_r \rangle$ 随燃料压力基本不变(压力在 10—200 atm 之间变化). 5) 当 DT 气压力大于 120 atm 时, 对应的, Multi-1d 计算的中子产额与实验结果基本一致, 表明 C_r 小于 7 的小收缩比压缩接近球一维压缩.

[1] Lindl J D, Amendt P, Berger R L 2004 *Physics of Plasmas* **11** 339

[2] Atzeni A, Meyer-ter-Vehn J 2004 *The Physics of Inertial Fusion* (Oxford: Clarendon Publications) p237—300

[3] Ramis R, Schmalz J, Meyer-ter-Vehn J 1988 *Computer Physics Communications* **49** 471

[4] Lin Z, Wang S, Fan D 2002 *High Power Laser and Particle Beams* **14** 403

[5] Gao Y M, Yu X, Li Y S 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 1858 (in Chinese) [高耀明、吕信、李云生 2007 强激光与粒子束 **19** 1858]

[6] Schnittman J, Craxton R 2000 *Physics of Plasmas* **7** 2964

[7] Giorla J, Poggi F, Paillard D 2002 *Physics of Plasmas* **9** 282

[8] Cavailler C 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** B389

[9] Sun K X, Huang T X, Ding Y K, Yi R Q, Jiang S E, Cui Y L, Tang X Q, Chen J S, Zhang B H, Zheng Z J 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1750 (in Chinese) [孙可煦、黄天暄、丁永坤、江少恩、崔延莉、汤晓青、陈久森、张保汉、郑志坚 2002 物理学报 **51** 1750]

[10] Marshall F, Delettrez J, Epstein R 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2108

[11] Bennett G, Wallace J, Murphy T 2000 *Phys. Plasmas* **7** 2594

[12] Jiang S E, Li S W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8840 (in Chinese) [江少恩、李三伟 2009 物理学报 **58** 8840]

[13] Li S W, Yi R Q, Jiang X H, He X A, Cui Y L, Liu Y G, Ding Y K, Liu S Y, Lan K, Li Y S, Wu C S, Gu P J, Pei W B, He X T 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3255 (in Chinese) [李三伟、易荣清、蒋小华、何小安、崔延莉、刘永刚、丁永坤、刘慎业、蓝可、李永升、吴畅书、古培俊、裴文兵、贺贤士 2009 物理学报 **58** 3255]

Design of implosion capsules with low convergence ratio driven by radiation on Shengguang II and Shengguang III prototype laser facilities *

Jiang Shao-En[†] Miao Wen-Yong Kuang Long-Yu

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 29 January 2010; revised manuscript received 23 July 2010)

Abstract

The design method for implosion capsules with low convergence ratio driven by radiation was developed. These kinds of the capsules used for the experiment on Shengguang II (SG-II) and Shengguang III prototype (SG-III-P) laser facilities were simulated using Multi-1d code. The implosion targets were designed, and the variations of convergence ratio, neutron yield and area density vs fuel pressure were obtained from the simulation. Two kinds of implosion targets with low convergence ratio on SG-II which were filled with DD and DT fuels respectively and a kind of the target on SG-III-P filled with DD were designed. The neutron yield calculated by Multi-1d with low convergence ratio agreed with the experimental data on Shengguang II laser facility. It showed that Multi-1d is reliable for use with these experiments.

Keywords: radiation drive, low convergence ratio, implosion, area density

PACS: 52.57.-z, 52.65.-y

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10775120).

[†] E-mail: jiangshn@vip.sina.com