

# 充气靶聚爆的简化物理模型

王润文 谭维翰

(中国科学院上海光机所)

**提要:** 由于大功率激光被充满 D-T 气体的玻壳靶均匀吸收, 并把 D-T 气体作为理想气体处理。分析时我们将玻壳分成几层。当最外层吸收激光后便爆炸内推, 同时将能量向内层传递。由于玻壳最内层产生的等离子体向内运动以及热传导作用使 D-T 球被压缩和加热。在这个简化物理模型下的分析计算表明与一维双温度 Lagrange 数学模拟编码程序计算结果相一致。

## Simplified physical model of implosive fusion pellet filled with gas

Wang Runwen Tan Weihan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

**Abstract:** Giant pulse laser energy is absorbed uniformly by the shell of glass pellet filled with D-T gas. D-T gas is taken as the perfect gas here. In our analysis the glass shell is presumed to be divided into several layers. After absorbing the laser energy, the outermost layer explodes and transfer the energy to the inner layers. The D-T sphere is heated and compressed owing to the kinetic energy of plasmas produced by the inner glass layers and the effect of thermal conductivity. The detailed analytical and computational results are in good agreement with those obtained by one dimensional two temperature Lagrange mathematical mode.

### 一、引言

激光照射聚变靶球的压缩过程的计算, 所涉及的因素是很多的。激光能量的吸收过程包括经典吸收与反常吸收; 在非线性相互作用下的能量散耗, 如散射与韧致辐射等; 能量输运过程包括电子热导、离子的粘性, 电子离子的碰撞弛豫交换能量及热波击波的传热传压等, 聚变反应产生的中子、 $\alpha$  粒子自加热等等, 现象是极为错综复杂的。激光核聚变

的计算机模拟对整个物理过程进行计算, 但是牵涉的因素甚多, 要调整的物理参数就很多, 若没有一组全面可靠的物理实验结果, 调整后的数学模型仍将与实际的图象存在较大距离, 同时从诸多的复杂因素中也不易确定那些因素是聚变压缩过程中最为主要的。我们用简单的物理模型, 认为激光与聚变靶的相互作用是通过靶球对激光的分层吸收。把充气氘氚气体玻壳靶球中的玻壳(当温度超过 100 电子伏时的等离子体可看做理想气体)

收稿日期: 1979 年 3 月 20 日。

分成若干层,而氙氟气体看成是理想气体,能量由外面大功率激光透入加热,各层分别受热膨胀并向相邻气体层加速运动来传递压力与能量。整个计算过程很直观,与一维双温度 Lagrange 编码程序<sup>[1,2]</sup> 计算结果相比较,基本上是符合的。

## 二、物理模型

充氙氟气体的玻壳靶球受球对称大功率激光照射后,迅速加热蒸发而电离,内能增加,等离子体便产生高速运动,图1所示,玻壳内径为  $r_1$ ,氙氟气体质量为  $M_{DT}$ ,球壳外径为  $r_4$ ,我们把它分割为3层分别是  $r_1 \sim r_2$ ;  $r_2 \sim r_3$ ;  $r_3 \sim r_4$ ,当激光照射电离后就可把玻壳看成自由气体。今考察  $r_4$ ,  $r_3$ ,  $r_2$  及  $r_1$  四个分界面的运动规律,对  $r_4$  球面而言,若忽略激光的光压则这一环状等离子体只有向外膨胀产生的压力  $P_4$ ,若其质量为  $M_3$ ,我们近似地认为一半质量  $\frac{M_3}{2}$  向外膨胀,另一半形成向内的压力  $P_4$ ,显然

$$\frac{1}{2} M_3 \frac{d^2 r_4}{dt^2} = 4\pi r_4^2 P_4 \quad (1)$$

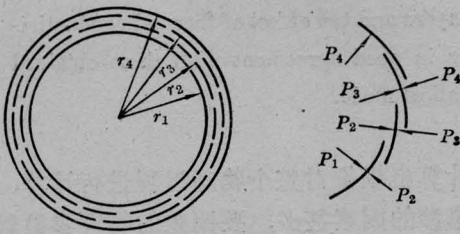


图 1

对  $r_3$  球面而言,它受到外环压力  $P_4$  及内环压力  $P_3$  的作用,同样  $r_2$  球受到  $P_3$  及  $P_2$  两边压力的作用,而  $r_1$  球面受到  $P_2$  及  $P_1$  两边压力的作用,于是有平均的运动方程是:

$$\frac{1}{2} M_3 \frac{d^2 r_3}{dt^2} = 4\pi r_3^2 (P_3 - P_4) \quad (2)$$

$$M_2 \frac{d^2 r_2}{dt^2} = 4\pi r_2^2 (P_2 - P_3) \quad (3)$$

$$M_1 \frac{d^2 r_1}{dt^2} = 4\pi r_1^2 (P_1 - P_2) \quad (4)$$

设大功率激光的功率为  $W(t)$ ,在照射时间  $t$  内激光总能量是

$$E = \int_0^t W(t) dt \quad (5)$$

若激光的能量被等离子体吸收后转变为气体的内能与动能,则有如下关系:

$$\frac{1}{\gamma-1} \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 = E \quad (6)$$

式中  $\gamma$  是比热比,  $\rho$ ,  $P$  分别为气体密度与压力,若令三层玻壳的吸收系数分别为  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ ,应用(6)式便有如下能量方程组:

$$\frac{1}{\gamma-1} \frac{P_4}{\rho_4} + \frac{1}{2} \left( \frac{dr_4}{dt} \right)^2 = A_4 E \quad (7)$$

$$\frac{1}{\gamma-1} \frac{P_3}{\rho_3} + \frac{1}{2} \left( \frac{dr_3}{dt} \right)^2 = A_3 E \quad (8)$$

$$\frac{1}{\gamma-1} \frac{P_2}{\rho_2} + \frac{1}{2} \left( \frac{dr_2}{dt} \right)^2 = A_2 E \quad (9)$$

至于靶球内核,由于所充的氙氟气体可认为在不吸收光能情况下将服从理想气体的  $P_1/\rho_1^\gamma = \text{常数}$  的关系。因为激光加热,热波与热导因素实际上是存在的,它必然导致气体内能增加,使气体的热力学性质偏离等熵过程,这样我们可得到如下关系式:

$$\frac{P_1}{\rho_1^\gamma} = \left( \frac{P_0}{\rho_0} + A_1 E \right) \frac{1}{\rho_0^{\gamma-1}} \quad (10)$$

式中  $A_1$  为一常数,通常是很小的,实际上靶球在加热过程中,靶核往往在玻壳产生的临界密度面以内,不会直接吸收光能,但由临界面与消熔面间向内传播的热波与热导作用能起着加热靶核的作用,把这些因素用  $A_1 E$  来代替。 $\gamma$  仍为比热比,应取为  $5/3$ ,但实际上压缩过程较复杂,并不是等熵的,有强的激波加热,有热波输运能量,  $P$  与  $\rho$  之间并不严格地服从  $P \propto \rho^{5/3}$  的关系,参照计算机数值计算结果,这里  $\gamma$  的取值要比  $5/3$  大,与 2 相近。

方程式(1)~(10)就是我们计算压缩聚变过程的基本物理方程组。

### 三、计算结果

为解出这组方程，我们采用了数值积分法，选取靶球外径为  $r_4 = 50$  微米，靶壁厚  $\Delta R = r_4 - r_1 = 0.75$  微米，分成等厚的三层，各为 0.25 微米，玻壳的固体密度为 2.2 克/厘米<sup>3</sup>。玻壳形成的等离子体气体比热比取为  $\gamma = \frac{5}{3}$ ，而靶核氖气体的比热比  $\gamma$  取为 2，时间步长为 4 毫微秒，大功率激光总能量  $\approx 30$  焦耳，波形是 100 微微秒、波长 1.06 微米的矩形脉冲，相应功率为  $3 \times 10^{11}$  瓦，正如图 2 所示，选取玻壳吸收系数为： $A_2 = A_3 = A_4 = 33\%$ ，而  $A_1 \approx 10^{-5}$ 。

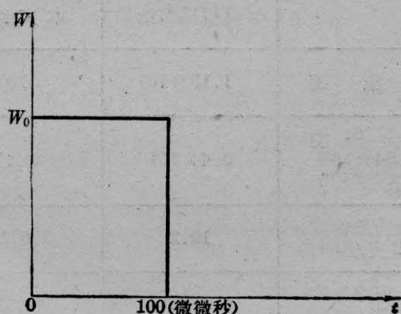


图 2

图 3 为  $r_1, r_2, r_3, r_4$  等四个球面随时间运动轨迹的计算曲线，可以看出球壳内表面  $r_1$  在激光作用时间内不断向球心压缩，激光

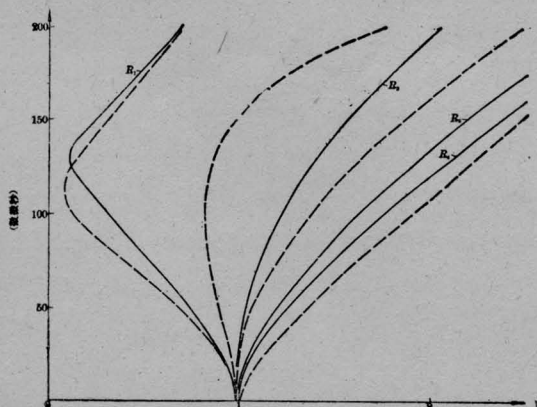


图 3

除去后，达到最大压缩比后就向外迅速膨胀。而  $r_2, r_3, r_4$  基本上是不断向外膨胀，这与通常数学模拟的计算结果是一致的。从曲线中容易得到靶核的体压缩  $\sim 10^3$  倍。

图 4 是  $r_1$  的平均运动速度与时间的关系曲线，在激光加热过程中，开始时是向内运动速度较大，最高速度达  $4 \times 10^7$  厘米/秒，之后由于内部被压缩致使压力上升向内加速运动渐渐下降，当光脉冲过去后，维持向心压力的因素没有了，靶核便以极大的速度向外膨胀。

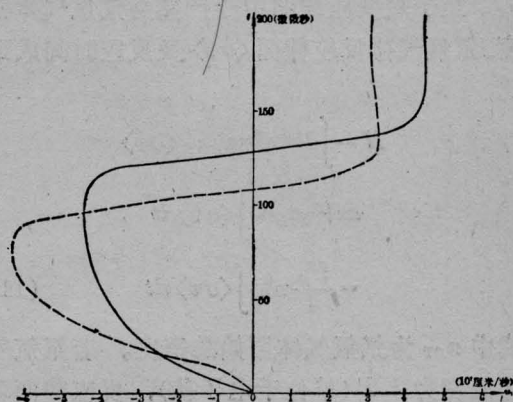


图 4

图 5 及图 6 是靶核内压力与密度随时间的变化，在靶核半径压缩至最小时，压力  $P_1$  及密度  $\rho_1$  也达到了峰值。

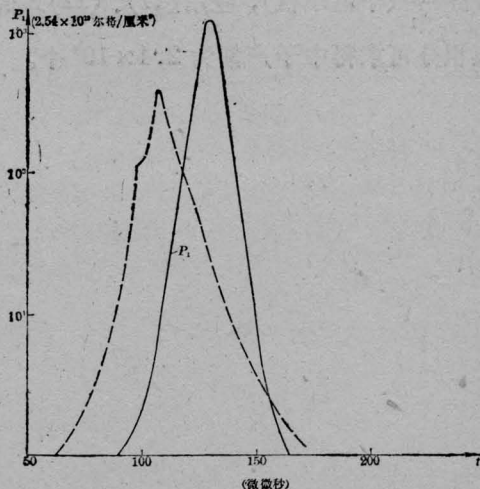


图 5



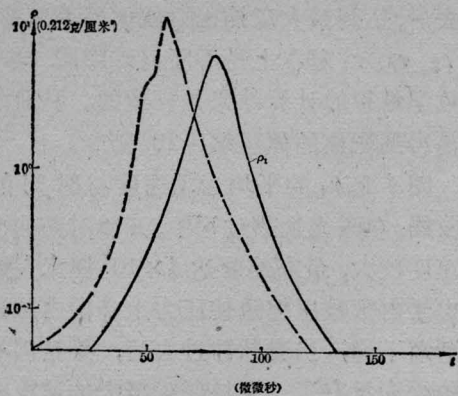


图 6

至于聚变压缩的中子产额与氘氟气体密度、氘氟气体反应截面  $\langle\sigma v\rangle$  及反应时间成正比:

$$\begin{aligned}
 N &= \int dt \int d^3r n_D n_T \langle\sigma v\rangle \\
 &\simeq V_0 n_D n_T \int \langle\sigma v\rangle dt \\
 &= \frac{V_0}{4} n_{DT}^2 \int \langle\sigma v\rangle dt \quad (11)
 \end{aligned}$$

式中  $n_{DT}$  为氘氟气体原始总密度。若氘氟气体温度为  $KT$  (单位千电子伏), 反应截面可表示成:

$$\begin{aligned}
 \langle\sigma v\rangle &= 3.8 \times 10^{-12} (KT)^{2/3} \\
 &\cdot \exp(-19.02/(KT)^{1/3}) \quad (12)
 \end{aligned}$$

氘氟气体温度可以由气体内能得到即  $KT = M_{DT} \frac{P_1}{\rho_1}$  (千电子伏), 应用(11)、(12)式的数值积分可求得中子产额为  $2.4 \times 10^9$  个。

与计算机模拟结果的比较, 图3~图6中都绘出两组曲线, 虚线代表计算机模拟的结果, 而实线是本文简单物理模型的计算结果, 图3中的  $r-t$  曲线  $r_1$  及  $r_2$  分别代表玻壳内壁与外壁的运动轨迹, 两组曲线是符合的, 中央两层是人为分割的, 由于两种模型取的层数大不相同而我们又采用了对光能是均匀吸收假定, 而计算机模拟并不如此, 故结果差别稍多。另外  $r$  的峰值压缩点与计算机模拟滞后十几个微微秒, 这一结果显然在  $u-t$ 、 $P-t$ 、 $\rho-t$  曲线都表现出来, 但在数量级及线廓上两组曲线是较为符合的。下表列出本文计算结果与计算机模拟结果的比较:

表 1

	计算机模拟结果	本文结果
体 压 缩	$1.13 \times 10^3$	$10^3$
最大压力 ( $2.54 \times 10^{13}$ 尔格/厘米 <sup>2</sup> )	$0.4 \times 10^3$	$1.2 \times 10^3$
最大压缩密度 (0.212 克/厘米 <sup>3</sup> )	10.2	6.1
最大压缩速度 (厘米/秒)	$6.4 \times 10^7$	$4 \times 10^7$
中 子 产 额	$1.05 \times 10^9$	$2.4 \times 10^9$

### 参 考 文 献

- [1] 谭维翰;《物理学报》, 1979, 28, 364.