

X 射线辐射驱动冲击波的实验测量与分析*

江少恩 郑志坚 李文洪 丁耀南 孙可照 刘永刚 蒋小华

(西南核物理与化学研究所, 成都 610003)

(1999 年 5 月 17 日收到; 1999 年 6 月 4 日收到修改稿)

在腔内充 CH 发泡材料, 提高辐射驱动冲击波的平面性. 利用楔形铝膜测量辐射驱动冲击波发光信号的条纹图像, 从而获得冲击波速度和冲击波压力. 利用冲击波速度与辐射温度的定标关系, 求得辐射温度.

PACC: 5250J; 5255; 5270

1 引 言

在惯性约束聚变(ICF)研究中,有直接和间接两种驱动形式.由于间接驱动对激光的均匀性要求有所降低,间接驱动的研究受到广泛的重视.相对直接驱动而言,间接驱动可以大大缓解直接驱动对激光辐照均匀性的要求,辐照驱动靶还对内爆时的流体力学不稳定性的影响不很敏感.另外间接驱动的靶性能与产生 X 射线辐射驱动能无关,只要求它们具有合适的光谱、时间和空间特性,而不需要针对具体的驱动器.

在 ICF 中,对冲击波的测量可以研究物质的状态方程(EOS)和不透明度(opacity).对间接驱动而言,还可以利用已知状态方程的材料样品(例如铝)测量驱动冲击波的辐射场的辐射温度,这种测量辐射温度方法称为冲击波法.

采用充发泡材料的柱腔靶,可以改善腔内 X 射线辐射的均匀性.虽然腔靶可使 X 射线辐射场有所均匀化,但仍需要进一步改善腔内 X 射线辐射均匀化性,因为冲击波的测量要求良好的平面性,作为驱动源的辐射场也应有良好的均匀性,发泡材料阻止腔壁等离子体向腔内喷射,有利于 X 射线辐射场的均匀化.

实验靶采用柱腔靶,在腔底部开窗口放楔形铝样品.激光辐照在转换材料上,转换为 X 射线,由 X 射线驱动不同材料样品产生冲击波,在样品背面用光学条纹相机测量冲击波发光的时空条纹图像.这种发光表征冲击波的有关信息,通过此楔形样品的冲击波发光的条纹图像可以直接测得冲击波的速度 V_S ,再由冲击波关系式可以得出冲击波的压力 P ,

再通过冲击波速度与驱动冲击波辐射场的辐射温度 T_R 的定标关系求出辐射温度 $T_R^{[1,2]}$.

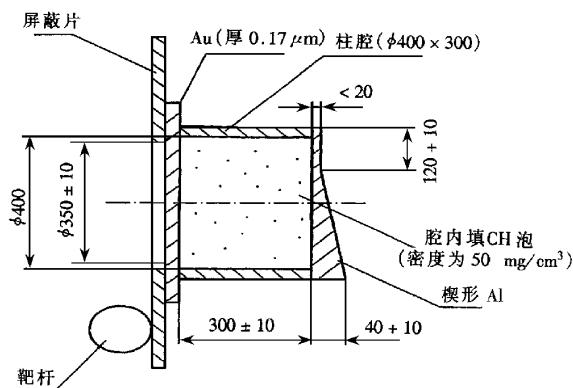


图 1 靶结构示意图(图中数字单位 μm)

实验在“星光 II”激光装置上进行,激光参数为能量 $\sim 90 \text{ J}$, 波长 $0.35 \mu\text{m}$, 脉宽 $500\text{--}800 \text{ ps}$, 打靶透镜 $f/D = 3$, 焦斑 $\sim \phi 300 \mu\text{m}$, 功率密度 $I_L \sim 2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$. 靶结构如图 1 所示, 靶参数已在图中标出. 激光入射方式为 90° 正入射, 之所以这样入射, 原因有二: 一是激光打靶容易瞄准, 二是正入射的入射率更高, 有利于提高辐射温度. 激光正入射打在腔靶入口处 $0.17 \mu\text{m}$ 厚的金箔上, 转换 X 射线. X 射线在充 CH 发泡材料(密度为 50 mg/cm^3)腔内中输运并使辐射场得到均匀化. 离焦打靶, 靶在焦后 $100 \mu\text{m}$, 焦斑大约 $300 \mu\text{m}$, 这是为了产生更均匀的辐射场, 提高冲击波的平面性, 提高测量精度. 实验布局如图 2 所示, 主激光经 M1, M2 两个伺服反射镜反射后入射到三倍频晶体, 经倍频后注入靶室内. 注意, 剩余基频光和 2 倍频光也将进入靶室, 因此, 在信号测试光路中必须注意采取相应的屏蔽措施, 在

* 国家自然科学基金(批准号: 19875045)资助的课题.

靶前的激光入口处加上屏蔽片. 考虑到是正入射, 剩余基频光和 2 倍频光焦斑较大(大约 0.8 cm), 必须采用较大的屏蔽片. 我们采用的屏蔽片的大小为 1 cm × 1 cm, 这么大的屏蔽片应能屏蔽基频光和 2 倍频光, 使条纹相机能正常工作. 该成像系统参数: $f/D = 4.5$, $f = 180$ mm, 放大倍数 $M = 10$. 引出靶室后成像于日产(1587-03 型)紫外可见光条纹相机狭缝上, 狭缝前加有特定滤光片防止杂散光的干扰. 条纹相机狭缝后接光学 CCD, 在计算机荧屏上记录条纹图像.

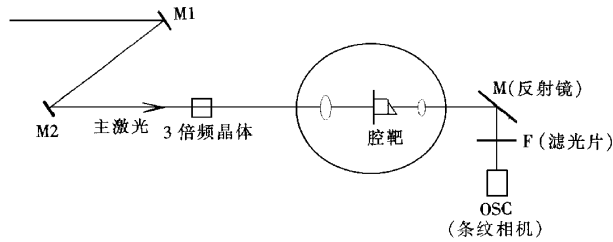


图 2 实验布局示意图

冲击波发光信号波段与腔内辐射温度及压力密切相关, 美国 LLNL 实验室在 NOVA 激光装置上进行的类似实验中^[3], 选取的冲击波发光信号波段为 280 ± 25 nm, 因我们的“星光 II”激光装置能量太小, 腔内辐射温度低, 因而样品背面的冲击波发光信号波段偏长. 在实际实验中, 将相机狭缝加组合滤光片, 滤片组包括 QB5 有色玻璃和 $0.35 \mu\text{m}$ 的全反镜, 透光波段为 400—500 nm, 具体的透过率曲线见图 4.

实验条件和安排见图 2.

2 冲击波速度测量原理

冲击波速度由冲击波发光从楔形样品出来的先后即条纹图像的斜率求得. 计算方法如下(图 3).

条纹图像的斜率 $k = \Delta x / \Delta t$, 则冲击波在 Δx

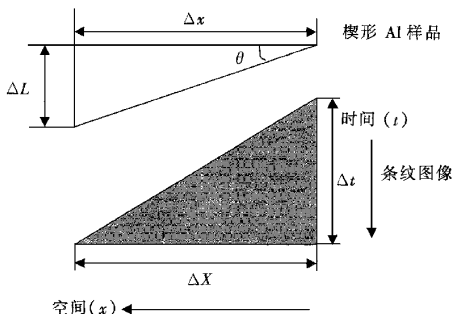


图 3 冲击波速度计算示意图

时间内, 走过的距离为 ΔL , 而 $\Delta L = \Delta x \text{tg} \theta$, 因此冲击波的速度为 $V_S = \Delta L / \Delta t = k \text{tg} \theta$, 即冲击波的速度与条纹图像的斜率成正比.

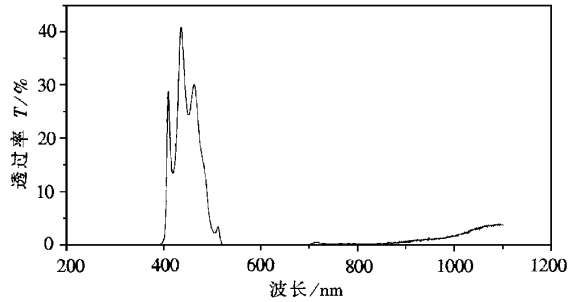


图 4 组合滤光片透过率曲线

3 测量结果及分析

“星光 II”激光的能量有限, 给实验测量带来很大的困难. 通过缩小腔体、减小样品厚度、激光正入射腔靶、加发泡材料等途径, 提高了辐射温度, 提高了冲击波的平面性, 从而成功的测得腔内充发泡材料产生的冲击波信号. 图 5 是我们采用楔形样品测得的冲击波条纹图像, 图中从上到下是时间分辨扫描方向, 横向是空间分辨方向. 图像中有两条暗线, 这是由于光学条纹相机的阴极被以前的其他实验的强光打坏的两个盲点而引起无响应所致.

依据前面所说明的冲击波速度 V_S 与斜率 k 的关系(实际的楔形样品测得 $\text{tg} \theta = 0.1$), $k = 8 \times 10^6$ cm/s. 于是 $V_S = 8 \times 10^5$ cm/s.

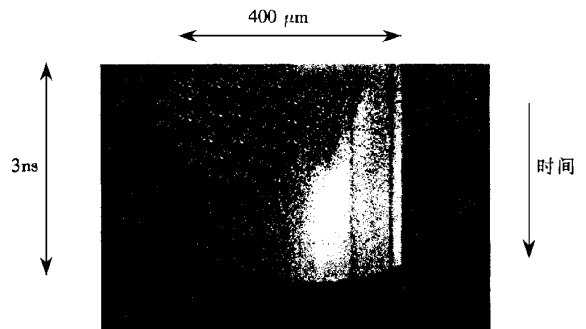


图 5 冲击波发光的条纹图像

由冲击波关系式 $V_S = c_0 + \lambda U$ 和 $P = \rho_0 V_S U$ 得到 $P = \rho_0 V_S (V_S - c_0) \lambda$, 式中 V_S 为冲击波速度, U 为波阵面后粒子速度, P 为冲击压力, ρ_0 为样品常态下的密度, c_0, λ 为样品的冲击绝热参数^[4]. 由此可得样品中的冲击波压力. 对 Al 样品 $c_0 = 5.25 \times 10^5$ cm/s, $\lambda_0 = 1.39$, $\rho_0 = 2.79$ g/cm³, 于是可

求出冲击波压力为 $P = 4.2 \times 10^{11}$ Pa.

根据辐射产生冲击波与辐射温度的关系 $T_R = 0.0126 V_S^{0.65}$ (其中 T_R 以 eV 为单位, V_S 以 cm/s 为单位), 可以求出辐射温度 $T_R = 65$ eV.

本次实验成功地测得腔内充发泡材料的冲击波信号, 从而测得辐射温度. 这为以后在“神光 II”装置上的实验通过冲击波测量辐射温度打下坚实的技术基础, 由于“神光 II”装置的能量比“星光 II”的能量大得多, 用冲击波方法测量辐射温度实现应更加容易. 可以成为除用软 X 射线能谱仪 (Dante) 谱仪测量间接驱动辐射温度的又一方法. 通过冲击波法测量腔内辐射温度有其局限性, 它没有时间分辨和能谱分辨. 但冲击波法测温有其优点, 它的精度较高, 并且更直接. 美国 Livermore (LLNL) 实验室在 NOVA 装置和将建造的 NIF 装置上, 都将冲击波测温法作为两种测温方法之一 (另一种是 Dante 谱仪) 进行辐射温度测量, 与 Dante 谱仪所测量的辐射温度进行对比, 使辐射温度的测量更加可靠^[1-3].

在 NOVA 装置上, 用 Dante 谱仪测量的辐射温度的误差为 5% 左右, 而采用冲击波测量辐射温度的误差为 $\pm 2\%$ 左右. 可见冲击波法测温的精度更高. 另外, 辐射温度 T_R 与冲击波 V_S 定标关系公式是对铝样品推出的, 据分析此定标公式对辐射温度低至 60—70 eV 仍然实用^[1].

其实, 我们通过自相似解也可以推导出辐射温度 T_R 与冲击波 V_S 定标关系公式. 由自相似解知, 辐射驱动冲击波的压力为^[5]

$$P(\text{Mbar}) = 44 S_S^{10/13} t^{-3/26}, \quad (1)$$

其中 S_S 为辐射场强度, 单位为 10^{14} W/cm², t 以纳秒为单位的时间. 由 Stefan-Boltzman 公式 $S_S = \sigma T_R^4$ 得

$$P = 44 \sigma^{10/13} T_R^{40/13} t^{-3/26} \propto T_R^{40/13}. \quad (2)$$

而由冲击波的压力 P 与速度 V_S 的关系, 即

$$P = \rho_0 V_S (V_S - c_0) \lambda \propto V_S^2. \quad (3)$$

于是由 (2) 式和 (3) 式相等, 得到

$$P \propto T_R^{40/13} \propto V_S^2,$$

$$T_R \propto V_S^{26/40} = V_S^{0.65}. \quad (4)$$

可见通过简单的自相似分析也可得到辐射温度与冲击波速度的定标关系. 与美国 LLNL 实验室通过理论分析与实验所得到的定标公式极为相近.

当热辐射烧蚀介质时, 要驱动一个冲击波, 向介质内部传播. 在辐射开始烧蚀介质时, 热波以超声速的速度先进入介质, 紧接着介质热膨胀产生一个稀疏波和冲击波. 而后, 稀疏波几乎伴随热波向介质中传播, 激波则很快远离热波跑在前面, 形成辐射烧蚀波的结构, 也即形成所谓的辐射波、冲击波和稀疏波三波相互作用的物理图像. 研究三波相互作用及传播特性较好的实验方式, 是在与冲击波传播垂直方向上采用背光方式观测三波时空变化情况^[6,7]. 由于“星光 II”装置是单束运行的而无背光束, 不能完成此项实验. 在“神光 II”装置上, 可以开展这项实验研究. 建议在“神光 II”上除了采用冲击波法测量辐射温度的实验以外, 应进行三波相互作用实验研究.

“星光 II”高功率激光装置运行人员和本所制靶工作人员为本次实验付出了辛勤劳动, 在此深表感谢.

- [1] R. L. Leeper *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **68**(1)(1997), 868.
- [2] R. L. Kauffman *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **73**(17)(1994), 2320.
- [3] R. L. Kauffman *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.*, **66**(1)(1995), 678.
- [4] 经福谦等, 实验物态方程导引(科学出版社, 北京, 1986), 第 87 页 [Fu-qiang Jing *et al.*, Introduction to experimental equation of state (Science Press, Beijing, 1986) p. 87 in Chinese].
- [5] R. Pakula *et al.*, *Phys. Fluids*, **28**(1985), 232.
- [6] B. A. Hammel *et al.*, *Phys. Fluids*, **B5**(7)(1993), 2259.
- [7] B. A. Hammel *et al.*, *Phys. Plasma*, **1**(5)(1994), 1662.

MEASUREMENT AND ANALYSIS ON SHOCK WAVE DRIVEN BY X-RAY RADIATION*

JIANG SHAO-EN ZHENG ZHI-JIAN LI WEN-HONG
DING YAO-NAN SUN KE-XU LIU YONG-GANG JIANG XIAO-HUA
(*Southwest Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003*)

(Received 17 May 1999 ; revised manuscript received 4 June 1999)

ABSTRACT

CH foam material is filled in the cavities in order to improve planar degree of shock wave driven by X-ray radiation. Wedge-shaped aluminum samples are used to measure time-space streaking images of optical signals from the shock wave. And then the velocity and pressure of the shock wave is obtained. The radiation temperature is obtained by using the scaled relations between velocity of shock wave and radiation temperature.

PACC : 5250J ; 5255 ; 5270

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 19875045).