

神光 II 上柱形黑腔辐射驱动冲击波*

江少恩 李文洪 孙可煦 蒋小华 刘永刚 崔延莉 陈久森 丁永坤 郑志坚

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2003 年 7 月 16 日收到 2003 年 11 月 18 日收到修改稿)

利用神光 II 的八路三倍频激光装置, 驱动柱形黑腔产生的 x 射线作辐射源驱动台阶铝样品产生冲击波, 获得了清晰的冲击波图像. 通过冲击波过台阶样品的时间差获得冲击波速度和压力分别为 31.2 km/s 和 17.5×10^5 MPa. 采用软 x 射线能谱仪通过激光注入孔测量的辐射温度与采用冲击波法测量辐射温度的结果一致.

关键词: 冲击波, 辐射驱动, 辐射温度

PACC: 5250J, 5255, 5270

1. 引 言

高压物理学在惯性约束聚变(ICF)研究中具有十分重要的作用, 利用高功率激光可以产生极高的冲击压力. 在 ICF 的冲击波实验中, 有两种方式即激光直接驱动和间接驱动. 对于直接驱动, 一般需要对激光束进行平滑, 以便使冲击波有较好的平面性, 而间接驱动相对而言, 更有优势, 首先, 间接驱动可以利用更多激光束和烧蚀更深, 从而产生更高的冲击压力; 其次, 间接驱动中可以形成较均匀的辐射场, 从而产生平面性较好的冲击波; 另外, 相对而言, 间接驱动的温度更低, 降低了冲击波样品预热的可能性; 最后, 间接驱动产生的冲击波速度与辐射温度有直接的定标关系, 因此, 可以利用冲击波速度来测量辐射场的辐射温度^[1,2]. 所以十分有必要研究“神光 II”条件下的辐射驱动冲击波.

冲击波测量有三个方面的要求, 即平面性、稳定性和干净性. 首先, 冲击波测量应用了一维平面冲击波关系式, 因此首先要求被驱动冲击波必须具有一维平面性. 其次, 在一个时间空间范围来测量冲击波速度和粒子速度, 因此要求在测试范围冲击波必须是稳定的, 这样才能减少测量误差. 最后, 利用激光能量驱动冲击波, 可能产生因激光打靶引起的激光反常吸收产生的大量超热电子的预热作用, 使得冲击波前未被压缩的物质不再保持常温常密度的初始状态, 从而造成测量误差.

激光光束匀滑技术可以提高冲击波的平面性,

并通过平面靶实验得到验证. 有关冲击波稳定性研究, 一方面通过激光波形整形为上升前沿陡峭的方波, 另一方面通过楔形靶实验来检验. 有关预热程度问题的检验定量实验还没有, 主要是根据理论估计. 不过, 可以通过实验观测冲击波在靶背面卸载时的发光信号上升前沿, 如果测试信号与激光功率密度或者辐射驱动稳定较低时的信号具有陡峭的上升前沿, 可以旁证没有预热^[3,4].

由于“神光 II”装置还没有光束匀滑措施, 所以冲击波的平面性难以达到所要求的精度, 在现有条件下, 应考虑采用间接驱动方式, 提高平面性, 采用方波打靶方式以满足稳定性要求, 优化靶设计, 尽量避免腔内 x 射线对冲击波样品的预热效应^[5-7].

我们利用“神光 II”八路激光驱动腔靶产生的辐射场来驱动样品, 测量冲击波速度, 并由此获得冲击波压力; 同时测量辐射场的辐射温度, 并与由冲击波速度的得到的辐射温度进行对比.

2. 实验条件

2.1. 靶型设计

在本实验中, 设计的驱动冲击波的辐射源为柱腔, 腔壁材料为 $20\mu\text{m}$ 厚的金, 腔长为 $1800\mu\text{m}$, 柱腔直径为 $800\mu\text{m}$, 腔两端激光注入孔(LEH)为 $\phi 380\mu\text{m}$, 在柱腔部开 $500\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$ 的长方形诊断孔(DH)作为驱动样品的辐射源, 长方孔接台阶铝样品, 基板厚为 $20\mu\text{m}$, 台阶厚为 $20\mu\text{m}$. 采用的腔长比神光 II 常用

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 863-804-3)资助的课题.

的柱腔 $800\mu\text{m} \times 1400\mu\text{m}$ 要长 $400\mu\text{m}$ ，其目的是为了降低激光第一打击点产生的高能 x 射线对冲击样品的辐照，降低预热效应^[8]，同时腔长增大，改善了辐射波在样品中产生冲击波的平面性。在柱腔的激光注入孔两端加有 $\phi 10\text{mm}$ 的屏蔽片，以避免散射光入射到冲击波样品上而进入光学条纹相机的视场范围而给测量带来干扰。

2.2. 激光打靶条件和实验排布

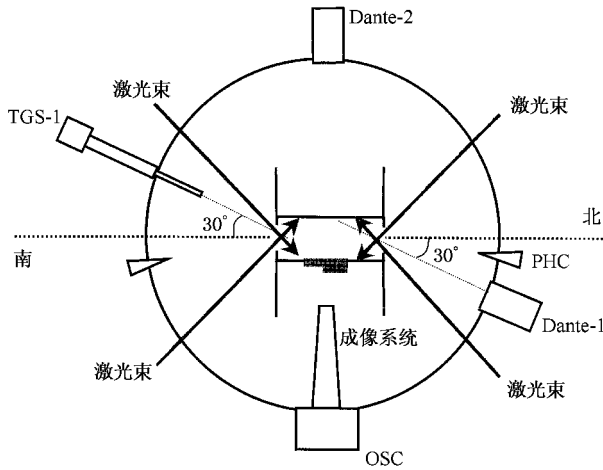


图 1 辐射驱动冲击波的探测器排布示意图(OSC 为光学条纹相机，Dante 为软 x 射线能谱仪，TGS 为透射光栅谱仪，PHC 为针孔相机)

“神光 II”三倍频装置的八束激光从南北注入腔靶，激光能量约 $8 \times 260\text{J}$ ，高斯型脉冲，脉宽 1ns ，激光离焦量 $400\mu\text{m}$ ，焦斑尺寸约 $300\mu\text{m}$ ，激光功率密度约 $3.5 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ ，激光入射方向与腔的轴线成 45° 角。实验探测器的排布见图 1，在图中与绘出了主要诊断设备的排布方式，OSC 用来测量冲击波发光信号，由 OSC 获取的图像来判断冲击波的均匀性和干净性问题，OSC 加了光学滤片，使 $300\text{—}400\text{nm}$ 的近

紫外光透过^[9]。成像系统采用凯塞格林(Cassegrain, CGT)望远镜，放大倍数为 10，由 OSC 和 CGT 构成的系统简称为扫描光学高温计(streaked optical pyrometer, SOP)，SOP 的时间分辨为 5ps ，空间分辨为 $10\mu\text{m}$ 。一台软 x 射线能谱仪(Dante-1)监测激光注入孔的辐射温度，一台软 x 射线能谱仪(Dante-2)安置在与 SOP 对面的位置上，从诊断口(DH)对面方向测量驱动样品的辐射温度。TGS 监测腔内软 x 射线能谱。

3. 实验结果及其分析

由 OSC 相机测量结果见图 2，图像横向为空间分辨方向，纵向为时间扫描方向。由这两个图知道，冲击波信号在水平空间方向分布是比较均匀的，这表明驱动冲击波的辐射场也是比较均匀的。图 2(a)是基板和台阶厚度都为 $20\mu\text{m}$ 的结果(212 发)，图 2(b)是基板厚度为 $40\mu\text{m}$ 、台阶为 $20\mu\text{m}$ 的结果(213 发)。图 2(a)中纵向的时间扫描为每像素 14ps ，图 2(b)中纵向的时间扫描为每像素 6.2ps 。图中的两个台阶是由于冲击波信号出样品的台阶的时间早晚而形成的，图中左边的冲击波发光信号先出来，对应于图 1 中台阶薄的基板。图像中台阶与基板之间的空隙是由于在加工样品台阶的进刀口造成的。对图 2(a)和(b)的时间扫描方向分别得到的曲线见图 3(a)(b)，图中的实线为过基板的扫描线，而虚线为过样品的扫描线，由这两条曲线的时间延迟就可以得到冲击波的传播时间，而样品厚的是已知的，于是可以求出冲击波的速度。由图(a)和(b)得到冲击波的传播时间分别为 630ps 和 650ps ，于是得到冲击波速度分别为 $20/0.64 = 31.2\mu\text{m}/\text{ns}$ ， $20/0.66 = 30.3\mu\text{m}/\text{ns}$ ($1\mu\text{m}/\text{ns} = 10^5\text{cm}/\text{s}$)，十分接近，这表明在两种样品中的冲击波速度基本相同。

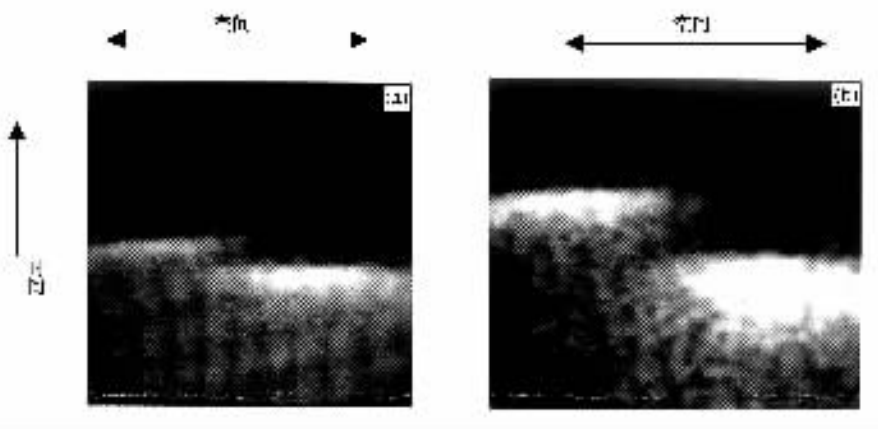


图 2 全腔靶驱动的冲击波发光信号的时空图像 (a)慢扫描 (b)快扫描

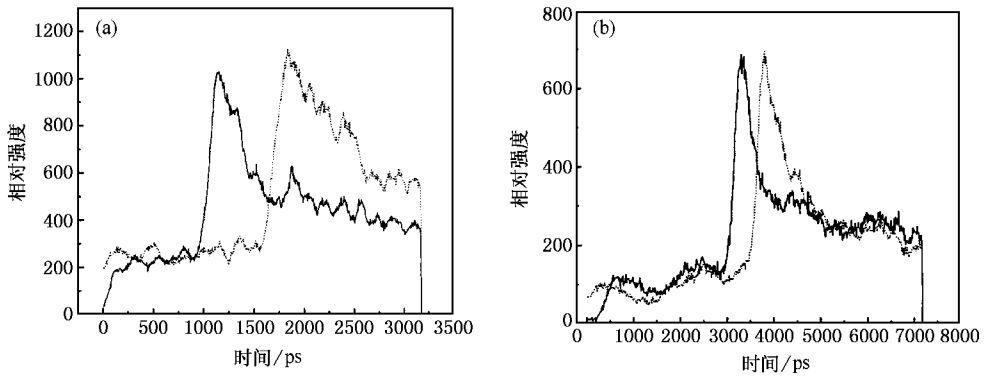


图3 台阶和基板时间延迟曲线(虚线为台阶,实线为基板)(a)慢扫描(对应图2(a)),(b)快扫描(对应图2(b))

另外由图3得知,时间前沿在100ps左右,预热效应比较低.

由冲击波速度通过定标关系可以得到辐射温度,即^[10]

$$T_R = 0.0126 D^{0.63}, \quad (1)$$

其中辐射温度 T_R 以 eV 单位,冲击波速度 D 以 cm/s 为单位.将冲击波速度代入可以得到两种样品的辐射温度分别为 155.5eV 和 152.6eV.

利用铝的冲击波速度 D 与波后粒子速度 U 的关系(见图4)^[6]

$$D = 5.85 + 1.22U, \quad (2)$$

式中 D 和 U 均以 km/s ($= \mu\text{m/ns}$) 为单位,可以得到波后粒子速度 U .于是可以得到冲击波压力 P 为

$$P = \rho_0 D U = \rho_0 D (D - 5.85) / 1.22, \quad (3)$$

式中 ρ_0 为铝的常态密度. P 和 ρ_0 分别以 MPa 和 kg/m^3 为单位, D 和 U 以 km/s 为单位.由图2(a),(b)得到冲击压力分别为 1.75TPa 和 1.64TPa.

光学条纹相机的时间分辨以及成像系统的空间分辨能估计冲击波速度误差,为 $\delta D/D = 4\%$,那么冲击压力 P 的误差为 $\delta P/P = 2\delta D/D = 8\%$.依据辐射温度 T_R 与冲击波速度 D 的关系式(1)可以得到辐射温度的误差为 $\delta T_R/T_R = 0.63\delta D/D = 2.5\%$,辐射温度的不确定度 δT_R 为 3.9eV.美国隶弗莫尔实验室(LLNL)的 Kauffman 等人在 NOVA 上也采用冲击波法测量了腔内的辐射温度^[11],冲击波速度和辐射温度分别为 $48.8\mu\text{m/ns}$ 和 207eV,辐射温度的不确定度 δT_R 为 5eV,辐射温度误差 $\delta T_R/T_R = 2.4\%$,与我们的误差(2.5%)基本相当.

由激光注入孔的软 x 射线能谱仪(Dante-1)测量的时间辐射温度曲线见图5,实线为 212 发的结果,

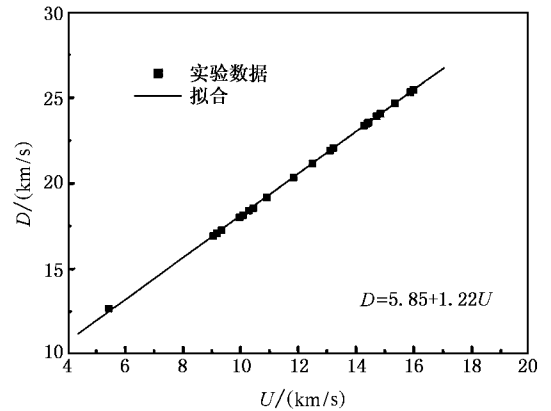


图4 冲击波速度 D 与波后粒子速度的关系

峰值辐射温度为 156.3eV,虚线 213 发的结果,峰值辐射温度为 152.8eV.比较 OSC 和 Dante 对辐射温度的测量结果,可以看出这两种测量原理完全不同的设备得到的结果相当一致,表明测量的可靠性.

由 Dante-2 测量的辐射温度曲线见图6(212发),可以看出从 LEH 测量的辐射温度 T_{R-LEH} 比从 DH 的辐射温度 T_{R-DH} 高,而由 SOP 测量的辐射温度 T_{R-SOP} 与 T_{R-LEH} 基本一致.原因分析如下:Dante-2 观测方位在腔靶正中,离激光焦斑处最远,完全是激光焦斑处辐射的 x 射线在金腔壁产生的再辐射,激光焦斑处的辐射温度最高,而离焦斑最远处的腔靶中部的辐射温度最低,因此 Dante-2 观测的辐射温度最低,而冲击波样品可以接受腔内各个方位来的 x 射线辐射,包括最高辐射温度的焦斑处的 x 射线,也包括最低辐射温度的腔靶中部的 x 射线,所以冲击波样品感受到的 x 射线辐射是腔内的综合效应,通过冲击波速度测量的辐射温度应该是腔的平均温度,

比 Dante-2 的温度即 T_{R-DH} 高而比焦斑处的温度低。

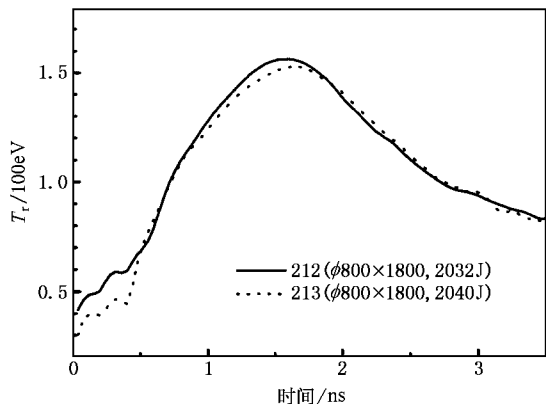


图 5 时间辐射温度曲线

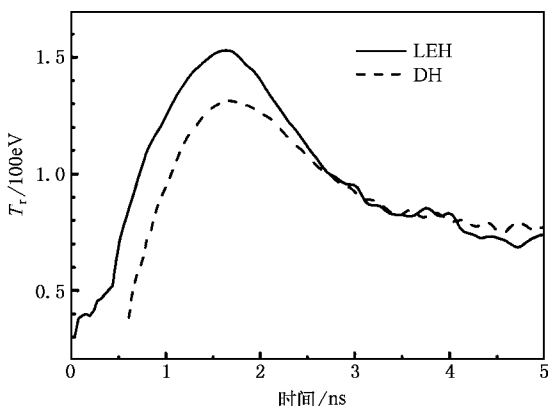


图 6 激光注入孔和诊断孔处由软 x 射线能谱仪测量辐射温度

激光焦斑位置离柱腔的中心点距离为 $500\mu\text{m}$ ，Dante-1 通过注入孔观测的点与激光焦斑的间距为 $190\mu\text{m}$ 。采用辐射运输的“漏水管”模型，该模型根据能量守恒定律和热波的自相似解建立的^[12-14]，将 x 射线在运输管中的运输过程看作 x 射线在运输管的衰减过程。输入端的 x 射线 E_{IN} 经过管壁的吸收 E_W 而衰减到输出端的 x 射线量为 E_{OUT} 。见图 7，由于运输管壁的辐射温度很不相同，不能用一个平均的辐射温度表示，我们将运输管进一步细分，分成很多小段，一般进行均分，第 $i-1$ 小段管的输出就是第 i 小段管的输入，在此小段管内近似认为辐射温度是相同的，于是整个沿腔轴的辐射温度空间分布就可以求出。以激光焦斑处的 x 射线作为辐射源，为了分析方便将激光看作是环状分布，于是近似计算处腔内温度的大致分布见图 8，图中纵轴为辐射温度的归一化量。图中标出了由 Dante-1 和 Dante-2 位置和

“漏水管”模型计算结果。计算时假定 Dante-1 测量结果是准确的即辐射温度 $T_{R-LEH} = 152\text{eV}$ ，计算得到的辐射温度为 136eV ，测量得到的辐射温度为 131eV 可以看出模型计算结果与测量结果相近。另外从注入孔观测得到的辐射温度与 SOP 测量的辐射温度相近，而 SOP 测量的温度表示腔内的平均温度，所以由激光注入孔测量的辐射温度基本能表示腔的辐射温度。

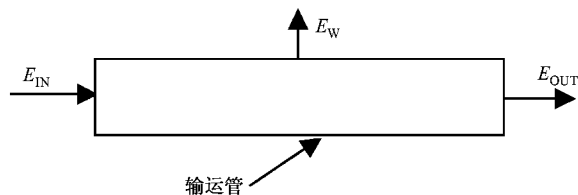


图 7 运输管中 x 射线运输的“漏水管”模型

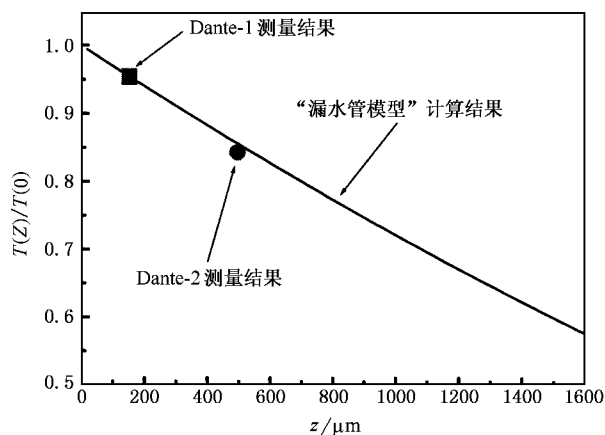


图 8 腔内以激光焦斑处为辐射源的辐射温度沿轴向分布

4. 结 论

本文的结果主要是：通过采用大的屏蔽片和更长的柱腔靶（长 1.8mm ）产生的辐射驱动冲击波平面性较好，得到了清晰的冲击波图像。采用这样的柱腔靶，在铝样品中产生的冲击波速度和压力分别为 31.2km/s 和 $17.5 \times 10^5\text{MPa}$ 。由冲击波法测量的辐射温度与软 x 射线能谱仪在注入孔测量的峰值温度基本一致。

感谢“神光 II”运行人员和激光研究中心制靶人员的大力支持和配合，没有他们辛勤的劳动，本工作将无法完成，在此表示衷心的感谢。

- [1] Lindl J 1995 *Phys. Plasmas* . **2** 3933
- [2] Jiang S E *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 94 (in Chinese) [江少恩等 2000 物理学报 **49** 94]
- [3] Koenig M *et al* 1995 *Phys. Rev. Lett.* **74** 2260
- [4] Lower T *et al* 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3186
- [5] Benuzzi A *et al* 1996 *Phys. Rev. E* **5** 2162
- [6] Rothman S D *et al* 2002 *Phys. Plasmas* **9** 1721
- [7] Cauble R 1997 *Physics of Plasmas* **4** 1857
- [8] Qi L Y *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 492 (in Chinese) [祁兰英等 2000 物理学报 **49** 492]
- [9] Jiang S E *et al* 2000 *Chinese Journal of High Pressure Physics* **14** 264 (in Chinese) [江少恩等 2000 高压物理学报 **14** 264]
- [10] Kauffman R L *et al* 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 678
- [11] Kauffman R L *et al* *Phys. Rev. Lett.* **73** 2320
- [12] Jiang S E *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 839 (in Chinese) [江少恩等 2002 物理学报 **51** 839]
- [13] Jiang S E *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1303 (in Chinese) [江少恩等 2000 物理学报 **49** 1303]
- [14] Jiang S E *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1507 (in Chinese) [江少恩等 2000 物理学报 **49** 1507]

Shock wave driven by x-ray radiation from cylindrical hohlraum on Shenguang II laser^{*}

Jiang Shao-En Li Wen-Hong Sun Ke-Xi Jiang Xiao-Hua Liu Yong-Gang Cui Yan-Li
Chen Jiu-Sen Ding Yong-Kun Zheng Zhi-Jian

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

(Received 16 July 2003 ; revised manuscript received 18 November 2003)

Abstract

A high Z cylindrical hohlraum was used to produce x-ray radiation flux, which was used to drive shock waves in an Al step sample. The radiation temperature is 155eV. Experiments were carried out on ' Shenguang II ' laser facility, with eight 250J, 0.35 μm wavelength, 1ns Gaussian laser pulses. The planar and preheat-free shock wave was generated and a clear image of shock and preheat wave was obtained. The shock wave velocity and pressure was 31.2km/s and 17.5×10^{11} Pa, respectively. The radiation temperature measured by streaked pyrometer, was consistent with that measured with a soft x-ray spectrometer which views through the laser entrance hole.

Keywords : shock wave, driven by x-ray radiation, radiation temperature

PACC : 5250J, 5255, 5270

^{*} Project supported by the National High-Technology Development Program of China (Grant No. 863 - 804 - 3).