文章编号：1000-5773(2005)04-0289-04

“神光Ⅱ”上冲击波法测量黑腔辐射温度*

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，四川绵阳 621900）

摘要：在“神光Ⅱ”三倍频装置上，由黑腔产生的辐射驱动铝台阶样品产生冲击波，采用光学条纹相机测量冲击波速度，利用冲击波速度与黑腔辐射温度的定标关系，获得了与软 X 光能谱仪测量相一致的辐射温度；采用热波关系和能量守恒原理对辐射温度进行了分析，计算结果与实验结果一致。

关键词：D 形腔；黑腔靶；辐射温度；冲击波；软 X 光能谱仪
中图分类号：O536；O347.5 **文献标识码**：A

1 引 言

在间接驱动惯性约束聚变(ICF)过程中，激光束入射到高 Z 材料的腔靶壁上产生 X 光，然后 X 光被腔壁材料再次吸收而产生再辐射，最终建立近似均匀、对称的辐射场，对称的 X 光辐照到氘氚靶丸上，烧蚀靶丸表面驱动内爆，压缩并加热热核燃料，实现热核聚变[1]。因此，黑腔辐射场的特征量即辐射温度是一个非常重要的物理量，如何在实验中精确测量黑腔辐射温度是十分关键的问题[2~5]。

测量辐射温度有两种不同的方法[6]：一种是用时间分辨的软 X 光能谱仪观测未被激光照射的一部分腔壁，给出黑腔的软 X 光谱，进而给出黑腔内爆区的辐射温度[7]；另一种方法为冲击波测温法，就是由辐射在低 Z 材料 Al 中驱动冲击波，通过冲击波速度测量辐射温度。第一种是目前测量辐射温度的主要方法，第二种方法作为补充，同时也是第一种方法的佐证，从而提高测量的可靠性。另外，由辐射温度 T_R 与冲击波速度 D 的定标关系已知[6]，冲击波测温法还可以改善辐射温度的测量精度。

2 实验条件

2.1 靶型设计

采用的靶见图 1，黑腔为 Au 壁 D 形靶，后接台阶铝样品，图中的数字单位是微米。由于激光焦斑面法线方向几乎与铝样品垂直，这样激光焦斑处的硬 X 光难以对铝样品产生预热效应。北四路激光从激光注入孔注入腔内，通过分析图 1 的几何关系，散射激光主要反射到腔壁，等离子体喷射方向主要在锥面的法向上，所以避免了散射光和等离子体回到注入口增大堵口效应的现象的发生。另外在激光注入孔方向和铝样品方向均加有大的屏蔽片，避免散射光对冲击波发光的干扰，据初步估计，散射光的强度比冲击波发光信号高几个量级，所以避开散射光的影响是冲击波测量成功的关键所在。

2.2 激光打靶条件和实验排布

4 束激光从北注入腔靶，激光能量约 4×260 J，脉宽 1 ns，激光离焦量 400 μm。实验探测器的排布见图 2，在图中绘出了主要诊断设备的排布方式，光学条纹相机(OSC)用来测量冲击波发光信号，OSC 加了光学滤片，使 300～400 nm 的近紫外光透过。成像系统由凯塞格林(Cassegrain)反射式望远镜构

* **收稿日期**：2004-09-23；**修回日期**：2005-01-06
基金项目：中国工程物理研究院科学技术基金(20030214)；高温高密度等离子体物理重点实验室基金(51480020103ZS7701)
作者简介：江少恩(1964—)，男，研究员，博士生导师，从事激光聚变实验研究. E-mail：jiangshn@vip.sina.com

成，这种望远镜由一块凹面镜和一块凸面镜组成，放大倍数为 10。记录系统为光学 CCD，由计算机采集图像。软 X 光能谱仪(Dante)监测激光注入孔的辐射温度。由针孔相机(PHC)监测激光注入情况。

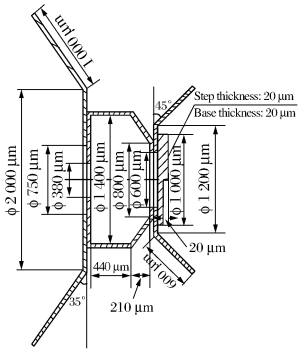


图 1 实验用的腔靶和铝台阶样品

Fig. 1 The drawing of hohlraum and aluminium step-shaped sample used in the experiment

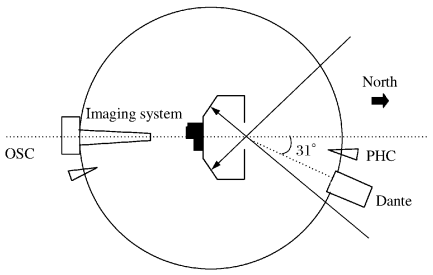


图 2 D 型腔驱动冲击波的探测器排布示意图

Fig. 2 The experimental setup for studies of shock wave driven by D-shaped hohlraum

3 实验结果

图3为D形靶(218发)驱动在Al中的冲击波发光图像，图中横向为空间方向，纵向为时间扫描方向。样品的台阶和基板厚度均为 20 μm。对台阶和样品进行扫描得到曲线见图 4，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。实验测得冲击波在 20 μm 的台阶距离中的传输时间为 800 ps，得到冲击波速度为 $D=25$ km/s。

由冲击波速度与辐射温度的定标关系，可以得到黑腔的辐射温度

$$T_R = 0.012\,6D^{0.63} \qquad (1)$$

式中：冲击波速度 D 以 cm/s 为单位，辐射温度 T_R 以 eV 为单位。由(1)式可得到 218 发黑腔的辐射温度 $T_R=135$ eV。

由 Dante 测量的时间温度曲线见图 5，峰值温度为 136 eV，与冲击波法测量的结果符合得很好。

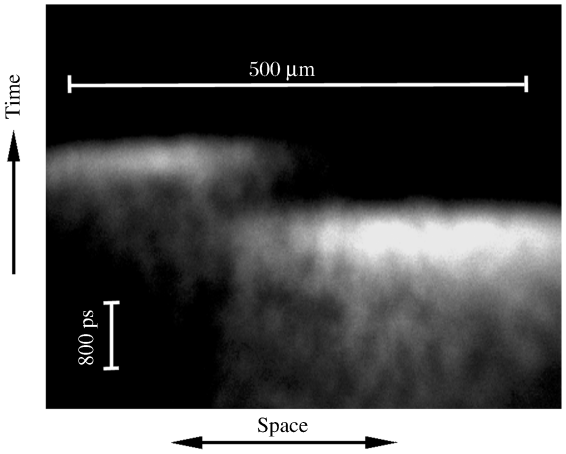


图 3 D 形腔驱动的冲击波发光信号的时空图像

Fig. 3 The image of optical signal from shock wave driven by D-shaped hohlraum

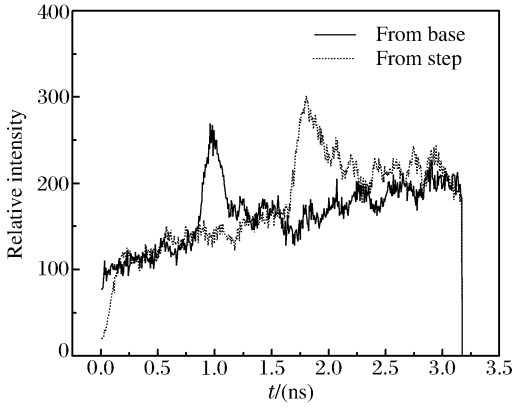


图 4 台阶和基板时间延迟曲线

Fig. 4 The time delay curves of step and base

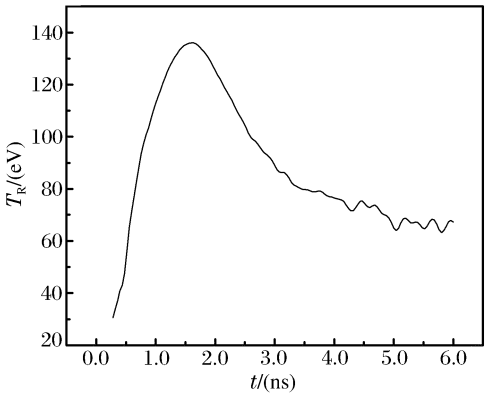


图 5 时间辐射温度曲线

Fig. 5 The radiation temperature versus time

4　实验结果简要分析

激光束通过激光注入孔辐照到腔壁上,在壁上部分激光能量转换成 X 光,由吸收和再辐射的 X 光继续烧蚀腔壁,形成热波向冷的腔壁材料传播。同时,X 光能量由于诊断孔和激光注入孔漏失而损耗或被放在腔内的聚变靶丸吸收而损耗。在空腔条件下,注入能量为激光转换为 X 光的能量,损失能量为在腔壁转化为热波能量和通过诊断和入射孔漏失的能量,于是整个腔内的功率平衡可以表示为

$$\eta P_{\mathrm{L}} = P_{\mathrm{W}} + P_{\mathrm{H}} \tag{2}$$

式中:P_{L} 为激光的功率,$\eta=\eta_{\mathrm{a}}\eta_{\mathrm{X}}$ 为激光转换为 X 光的转换效率(其中 η_{a} 和 η_{X} 分别为激光吸收率和 X 光的转换率)。P_{W} 为 X 光在腔壁内产生的热波单位时间的能量损失

$$P_{\mathrm{W}} = (1-\alpha)\sigma T^4 A_{\mathrm{W}} \tag{3}$$

式中:α 为腔壁的 X 光反照率,T 为腔壁的辐射温度,A_{W} 为腔壁的面积。通过激光注入孔和诊断孔漏失的 X 光功率 P_{H} 为

$$P_{\mathrm{H}} = \sigma T^4 A_{\mathrm{H}} \tag{4}$$

式中:A_{H} 为注入孔和诊断孔的面积之和。

采用辐射黑腔单位 r. h. u(radiation-haulraum unit),即 T 以百电子伏(heV)为单位,时间以纳秒(ns)为单位,面积以 mm^2 为单位,能量以百焦耳 hJ 为单位,功率单位取 10^{11} W=hJ/ns=10^2 J/(10^{-9} s),功率密度单位为 10^{13} W/cm^2=hJ/(mm^2 · ns)=10^2 J/(10^{-2} $\mathrm{cm}^2\times10^{-9}$ s)。(3)式和(4)式中的 $\sigma=1$,于是由(2)式、(3)式、(4)式得到

$$\eta P_{\mathrm{L}} = [(1-\alpha)A_{\mathrm{W}} + A_{\mathrm{H}}]T^4 \tag{5}$$

根据辐射热波的自相似解有[2]

$$T = 262.2 t^{2/13} S_{\mathrm{W}}^{4/13} \tag{6}$$

$$S_{\mathrm{R}} = 4.87 t^{8/13} S_{\mathrm{W}}^{16/13} \tag{7}$$

式中:T 和 t 分别以 eV 和 ns 为单位,S_{R} 和 S_{W} 以 10^{14} W/cm^2 为单位,S_{R} 为腔壁的再辐射强度,且 $P_{\mathrm{W}}=S_{\mathrm{W}}A_{\mathrm{W}}$。将上两式以 r. h. u 单位表示,则成为

$$T = 5.32 t^{2/13} S_{\mathrm{W}}^{4/13} \tag{8}$$

$$S_{\mathrm{R}} = 8.30 t^{8/13} S_{\mathrm{W}}^{16/13} \tag{9}$$

根据反照率的定义,即

$$\alpha = S_{\mathrm{R}}/(S_{\mathrm{R}} + S_{\mathrm{W}}) \tag{10}$$

将(9)式代入(10)式,并利用(8)式得到

$$\alpha = (1 + 0.68 T^{-0.75} t^{-0.5})^{-1} \tag{11}$$

将(11)式代入(5)式得到

$$\eta P_{\mathrm{L}} = \left\{[1-(1+0.68T^{-0.75}t^{-0.5})^{-1}]A_{\mathrm{W}} + A_{\mathrm{H}}\right\} T^4 \tag{12}$$

式中:η、P_{L}、A_{W} 和 A_{H} 均为已知量,仅有一个未知量 T,通过迭代方法即可以求出辐射温度 T,迭代初值取 $\alpha=0$,迭代五六次即收敛。

由图 1 可以得到腔壁面积为 $A_{\mathrm{W}}=4.3$ mm^2,孔面积 $A_{\mathrm{H}}=0.4$ mm^2。对(12)式进行计算可以得到 D 形腔辐射温度随激光能量的变化关系曲线(见图 6,图中的上下两条曲线取 η 分别为 70% 和 60%)。图 6 中也给出了由冲击波法测量的辐射温度实验数据,辐射温度测量根据冲击波速度测量误差 $\Delta D/D$ 给出,光学条纹相机的时间分辨以及成像系统的空间分辨可以估计出 $\Delta D/D=6\%$,于是依据辐射温度

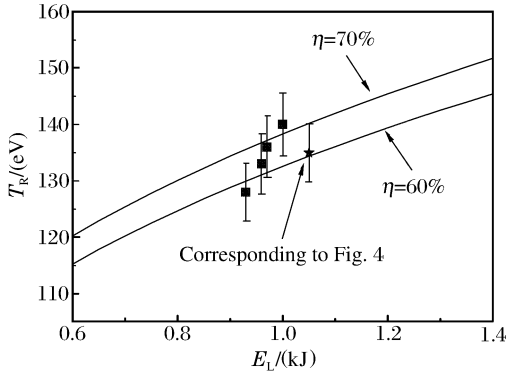


图 6　D 形腔的辐射温度与激光能量的关系曲线

Fig. 6　Radiation temperature of D shaped hohlraum versus laser energy

与冲击波速度 D 的关系式(1)式可以得到

$$\Delta T_R/T_R = 0.63\Delta D/D \tag{13}$$

从而得到辐射温度误差为 $\Delta T_R/T_R = 0.63\times 6\% = 3.8\%$。软 X 光能谱仪测量辐射温度的误差约为 8%。在图 6 中还给出了对应图 4 测量实验数据点,为了区别,以"★"号表示。从图看出,实验点基本在两条曲线内,可见上面的分析是合理的[8,9]。

5 结论和讨论

通过本项目的研究表明:(1) 采用大的屏蔽片可以避免散射光对冲击波发光信号的干扰,同时采用 D 形腔可以降低 M 带的预热效应,从而得到了清晰的冲击波图像;(2) 由冲击波法测量的辐射温度与 Dante 在注入口测量的峰值温度基本一致;(3) 采用热波自相似解和能量守恒建立的模型得到的结果与实验结果基本符合。

References:

[1] Lindl J, Amendt P, Berger R, et al. The Physics Basis for Ignition Using Indirect-Drive Targets on the National Ignition Facility [J]. Phys Plasmas, 2004, 11(2): 339－491.

[2] Suter L J, Kauffman R L, Darrow C B, et al. Radiation Drive in Laser-Heated Hohlraum [J]. Phys Plasmas, 1996, 3(6): 2057－2062.

[3] Glennzer S H, Suter L J, Turner R E, et al. Energetics of Inertial Confinement [J]. Phys Rev Lett, 1998, 80(30): 2845－2848.

[4] Dattolo E, Suter L J, Moteil M C, et al. Status of Our Understanding and Modeling of X-Ray Coupling Efficiency in Laser Heated Hohlraums [J]. Phys Plasmas, 2001, 8(1): 260－265.

[5] Rosen M D. The Science Applications of the High-Energy Density Plasmas Created on the Nova Laser [J]. Phys Plasmas, 1996, 3(5): 1803－1812.

[6] Kauffman R L, Kornblum H N, Phillion D W, et al. Drive Characterization of Indirect Drive Targets on the Nova Laser [J]. Rev Sci Instrum, 1995, 66(1): 678－682.

[7] Sun K X, Yang J G, Zheng Z J. A Sub-keV X-Ray Spectrometer Used in Laser Plasma Interaction Experiments [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1990, 2(1): 16－22. (in Chinese)
孙可煦,杨建国,郑志坚. 用于激光等离子体诊断的亚千 X 射线能谱仪 [J]. 强激光与粒子束, 1990, 2(1): 16－22.

[8] Chang T Q, Ding Y K, Lai D X, et al. Laser Hohlraum Coupling Efficiency on the Shenguang Ⅱ Facility [J]. Phys Plasmas, 2002, 9(11): 4744－4748.

[9] Chang T Q, Wang G Y, Li Y S, et al. Inferring the Capsule-Absorbed Radiation Energy from Experimental Hohlraum Radiation Temperature [J]. Phys Plasmas, 2004, 11(9): 4286－4289.

Measurement of Radiation Temperature in Hohlraum with Shock Wave Method on 'Shenguang Ⅱ' Laser Facility

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

(*Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The D shaped cavity has been used to measure the radiation temperature in Hollraum on 'Shenguang Ⅱ' laser facility. The radiation temperature was measured using two methods. One method measured the shock wave velocity produced in low-Z materials such as Al driven by the emission from hohlraum. The shock velocity was detected using optical streaked camera to observe the optical signal emitted from the rear of a step Al placed over a hole in the cavity wall. The second method measured the re-radiated X-ray flux from the cavity wave viewing through another hole in the cavity with soft X-ray spectrometer. Both methods have been shown to provide a consistent characterization of the X-ray drive in the cavity target. The experimental results were analyzed using a model that was based on heat wave similarity and energy conversation law.

Key words: D shaped cavity; hohlraum; shock wave; radiation temperature; soft X-ray spectrometer