

神光 II 激光装置黑腔辐射温度定量研究*

李三伟[†] 宋天明 易荣清 崔延莉 蒋小华 王哲斌 杨家敏 江少恩

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2010年3月15日收到;2010年7月26日收到修改稿)

在2009年度神光 II 装置上获得了可重复的冲击波数据,并与精密标定之后的软 X 射线能谱仪(SXS)给出了自洽的黑腔辐射温度.在三倍频激光能量 2.1 kJ、脉宽 1 ns 条件下,对于神光 II 输运腔($\Phi 0.8\text{ mm} \times 1.7\text{ mm}$, LEH $\Phi 0.38\text{ mm}$)辐射温度约为 180 eV,对于原型输运腔($\Phi 1.0\text{ mm} \times 2.1\text{ mm}$, LEH $\Phi 0.6\text{ mm}$)辐射温度约为 150 eV.采用蒙特卡罗方法编制了数值计算程序,建立了辐射温度测量不确定度评估方法;通过精密标定和多种改进措施之后,基本建立了辐射温度精密诊断能力,黑腔辐射温度测量相对不确定度由过去的约 8% 降低到目前的约 3% ($K=1$).

关键词: 黑腔辐射温度, 冲击波速度, 蒙特卡罗方法, 不确定度分析

PACS: 52.70.La, 52.70.-m, 52.65.Pp, 52.35.Tc

1. 引言

在激光间接驱动惯性约束聚变(ICF)研究中,辐射温度是黑腔辐射源最重要的特征物理量,是激光腔靶能量耦合效率评估计算的重要参数,是了解激光腔靶耦合物理过程以及辐射源应用实验设计的基础^[1-6].目前通常采用两种方法测量辐射温度:一种方法是通过激光注入孔或诊断孔用软 X 射线能谱仪^[7,8](SXS)直接测量黑腔辐射软 X 射线能谱,然后通过对能谱积分获得等效辐射温度;另一种方法是利用光学高温计(SOP)测量冲击波图像,由冲击波速度与辐射温度的定标关系给出腔内等效峰值辐射温度^[9].

由于近几年建立了辐射驱动冲击波测量技术和实验方法,特别是在2008年度开展了光学条纹相机全屏扫速精细标定实验,消除了条纹相机空间畸变对实验数据的影响,在冲击波测量过程中发展了一套新的数据处理方法^[10],提高了数据处理精度,降低了扫速非线性的影响,实现了辐射驱动冲击波速度高精度诊断,大部分实验发次冲击波速度测量相对不确定度小于 2% ($K=1$);同时细致地评估了神光 II 软 X 射线能谱仪各道滤片厚度、X 射线平面

镜反射效率和真空 X 射线二极管(XRD)探测器灵敏度的不确定度对辐射温度的影响权重,确认了平面镜反射效率、XRD 灵敏度标定精度是辐射温度测量不确定度的主要影响因素.

在此基础上于2008年度在神光 II 装置上开展了不同方法测量辐射温度的比对研究,采用冲击波方法获得的辐射温度比软 X 射线能谱仪给出的辐射温度约高 10 eV.研究表明,需要进一步开展滤片、平面镜、XRD 等相关元件的精密标定工作,降低标定不确定度.为此2009年7月份在北京同步辐射源新束线4B7B上开展了SXS谱仪相关部件的精密标定工作.

在本轮神光 II 实验过程中严格控制靶参数和激光参数,通过精密标定提高了探测器诊断精度,获得了可重复的冲击波实验数据,并与标定后的SXS给出了自洽的辐射温度,获得了可以理解的神光 II 1 ns 黑腔耦合效率.在实验过程中部分发次借用中物院上海11所新光学条纹相机测量冲击波图像,其目的是检验本单位C1587老相机获得的冲击波速度的可靠性,另外少量发次采用铝铜阻抗匹配方法检验Al样品冲击波速度测量精度.精密物理实验研究非常重要,只有物理实验数据足够精密才能研究出物理规律,才能够进行腔靶结构和材料的优

* 国家高技术研究发展计划资助的课题.

[†] E-mail: lisanwei@sohu.com, or lisanwei@mail.ru

化,才能够设计出我们自己的未来基准点火靶。

2. 冲击波法测量峰值辐射温度

2.1. 辐射驱动冲击波研究最新进展

2006 年度本单位建立了辐射驱动冲击波诊断技术,由于冲击波样品厚度采用显微镜测量,冲击波图像采用 C979 相机(5ps/pixel)记录,当时冲击波速度测量不确定度很大约为 25%。随后进行了一些改进:冲击波样品厚度采用白光干涉仪测量,C979 相机全屏扫速精密标定,2007 年度冲击波速度测量不确定度约为 7%。随后进行了一系列改进:采用金刚石车床直接加工冲击波台阶样品,同时加工多块样品,优中选优,每块样品厚度采用白光干涉仪和非接触共焦光学测量系统多点多次测量;冲击波图像采用 C1587 相机(1.5 ps/pixel)记录;实验前采用 8 ps 光源(526 nm)对 C1587 相机全屏扫描速度进行精密标定,编制了标定数据自动化处理程序,给出了每个像素点的扫描速度;根据标定结果矫正了冲击波图像的空间畸变;理论上中物院九所四室考察了金 M 带预热效应对 Al 样品冲击波速度的影响,同时对冲击波样品厚度进行了优化设计;靶上增大了诊断孔尺寸,减小了辐射烧蚀的二维效应,从而改善了冲击波的平面性。经过这些改进措施之后,目前辐射驱动冲击波速度测量相对不确定度约 2%($K=1$,置信度 68%)。

冲击波速度^[11,12]测量不确定度的各种因素按照来源可以分为三类。一是源于样品厚度 Δd 的不确定度,它包括了样品台阶高度的测量不确定度及测量仪器的自身不确定度,也包括了样品表面粗糙度的影响。二是源于渡越时间 Δt 的不确定度,它包括了冲击波发光时间的读数不确定度和条纹相机自身的扫速晃动以及诊断系统时间分辨率的影响。三是源于测量方法的不确定度,即冲击波在样品台阶区域传播的平面性和稳定性的不确定度,同时包含了样品自身非均匀性以及样品预热带带来的不确定度。理论上第三类因素的分析依赖于物理模拟能力,非常复杂。

样品中冲击波速度 $U = \Delta d/\Delta t$, 依据不确定度传递公式,冲击波速度测量相对不确定度为

$$\left(\frac{\delta U}{U}\right)^2 = \left(\frac{\delta \Delta d}{\Delta d}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta t}{\Delta t}\right)^2, \quad (1)$$

其中

$$(\delta \Delta d)^2 = (\eta \times \Delta d)^2 + (\delta d_1)^2 + (\delta d_2)^2, \quad (2)$$

$$\Delta d = d_1 - d_2, \quad (3)$$

$$(\delta \Delta t)^2 = (\Delta T_{cr}/3)^2 + (\delta V_1)^2 (Ch_1 - Ch_2)^2 + V_1^2 \times [(\delta Ch_1)^2 + (\delta Ch_2)^2], \quad (4)$$

$$\Delta t = V_1 \times (Ch_1 - Ch_2), \quad (5)$$

式中, $\frac{\delta U}{U}$, $\frac{\delta \Delta d}{\Delta d}$, $\frac{\delta \Delta t}{\Delta t}$ 分别为冲击波速度、台阶样品厚度差和冲击波渡越时间测量相对不确定度; d_1, d_2 , $\delta d_1, \delta d_2$ 分别是样品台阶厚度、基底厚度、台阶厚度测量不确定度和基底厚度测量不确定度; η 为白光干涉仪测量精度; Δd 为台阶样品厚度差; ΔT_{cr} 为相机自身时间分辨率; V_1 为相机扫描速度, δV_1 为相机扫描非线性; Ch_1, Ch_2 分别为台阶样品和基底样品冲击波发光起始道数, $\delta Ch_1, \delta Ch_2$ 为冲击波发光起始道数的判读不确定度; Δt 为冲击波渡越时间。

2.2. 冲击波速度与驱动源辐射温度定标关系

由于冲击波速度与加载在介质上的辐射源强度密切相关^[9],因此在 ICF 研究中利用这种强关联发展了一套通过冲击波速度诊断黑腔辐射温度的实验方法。

黑腔等效峰值辐射温度与 Al 样品冲击波速度之间存在一个简单的定标关系^[13,14],比例常数和指数依赖于 Al 材料的状态方程 EOS、不透明度参数 Opacity 以及辐射源时间行为。针对神光 II 装置和神光 III 原型装置 1ns 腔靶辐射源 T_r 时间波形,中物院九所四室李永升等人利用一维辐射输运流体力学程序 RDMG 的数值模拟结果对辐射温度 T_r 与 Al 样品冲击波速度 D 的定标关系进行了系统研究,给出了两个装置 1 ns 腔靶统一定标关系表达式

$$T_r(\text{eV}) = 0.01134(D/\text{cm/s})^{0.6347}, \quad (6)$$

其中 Al 样品冲击波速度以 cm/s 为单位,辐射温度 T_r 以 eV 为单位。软 X 射线能谱仪(SXS)所获得的辐射温度与通过冲击波速度所确定的辐射温度是不一样的。通过冲击波速度得到的辐射温度是样品区感受到的峰值辐射温度,由从黑腔进入样品的入射能流所决定;而通过 SXS 谱仪所测得的辐射温度则由黑腔壁再发射流所决定的。因此通过这两种方式给出的辐射温度是不同的。其次,SXS 谱仪所给出的辐射温度也与其安装方位,即与观测角度有关。这是因为安装于靶室不同方位的 SXS 谱仪所对应的黑腔中光斑区、激光入射孔大小是不一样的,因而所接受到的辐射能流大小也不一样,所以给出的

辐射温度也就不一样。

3. 软 X 射线能谱仪测量时间分辨辐射温度

3.1. 软 X 射线能谱仪精密化研究进展

软 X 射线能谱仪(SXS)每道由 X 射线滤片、掠入射 X 射线平面镜和真空 X 射线二极管(XRD)构成,通过滤片的低能截止和平面镜的高能截止把 X 射线进行能谱分割成一段能区测量. 2008 年度仔细研究了 SXS 测量 T_r 不确定度的来源项;考察了 SXS 各部件对 T_r 测量不确定度的影响权重;2009 年度改进了 SXS 瞄准方法和时标系统;考察了电缆衰减、滤片荧光效应、紫外杂散光、高压的影响;完成了 SXS 滤片、X 射线平面镜、XRD 探测器的精密标定;建立了 T_r 不确定度评估方法(蒙特卡罗方法);考察了不同计算方法对 T_r 不确定度的影响;目前由 SXS 给出的 T_r 测量相对不确定度约 3% ($K=1$)。

3.2. 软 X 射线能谱仪相关部件精密标定

2009 年 7 月份在北京同步辐射源低能束线(4B7B 束线,0.1—1.6 keV)和中能束线^[15](3B3 束线,2.1—3.5 keV)上完成了一台 SXS 谱仪(共计 14 道)滤片、平面镜、XRD 探测器灵敏度的精密标定,获得了具有较高置信度的滤片透过率曲线、平面镜反射率曲线和 XRD 灵敏度曲线,同时对光源的单色性、高次谐波以及源强稳定性、探测器响应一致性和数据采集统计误差等多项不确定因素进行了系统评估。

通过优化光源特性和提高实验精度,获得了较好的标定实验数据. 图 1 给出了 2009 年度标定获得的 4.07° Ni 平面镜反射率曲线^[16],大部分能点 Ni 平面镜反射率相对不确定度小于 3.5% ($K=1$). 在图 1 曲线中有明显的碳吸收边和氧吸收边,表明该块 Ni 平面镜碳污染和氧化均较严重. 在 2009 年度标定实验中,由于束线本身谐波抑制镜油污污染很严重,因此在 280—310 eV 区间,光源强度非常弱,造成反射率实验测量结果在这个能段的统计误差较大。

图 2 给出了 2009 年度标定获得的 0506 号 Al 阴极 XRD 灵敏度曲线,大部分能点标定结果相对不确定度小于 4% ($K=1$). 从图 2 可以看出 Al 阴极

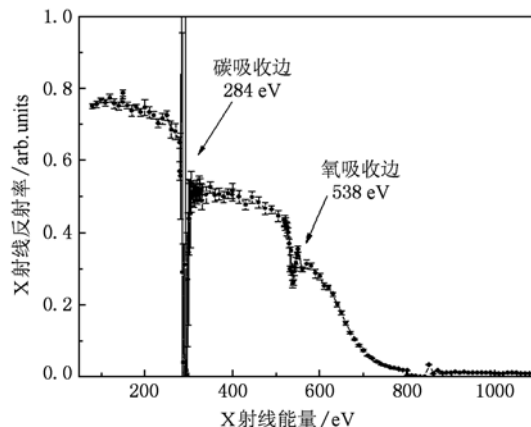


图 1 2009 年度标定获得的 4.07° Ni 平面镜反射率曲线

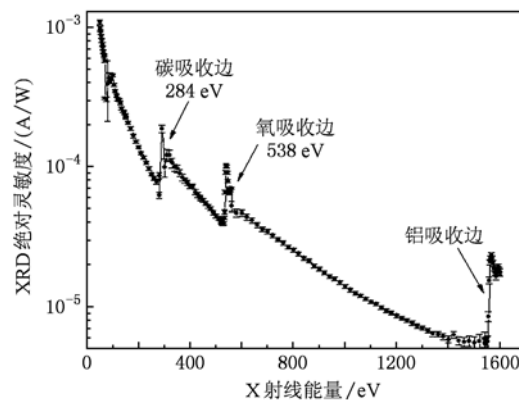


图 2 2009 年度标定获得的 0506 号 Al 阴极 XRD 灵敏度曲线

XRD 油污污染、氧化严重. X 射线作用在 Al 阴极表面,通过光电吸收产生光电子,光电子在电场作用下被阳极收集形成电流,如果没有油污污染和氧化,Al 阴极 XRD 灵敏度曲线与常态 Al 材料光电吸收截面相近似。

3.3. 黑腔辐射温度不确定度分析

目前通常采用等效平响应方法求解等效积分辐射温度^[17,18]. 等效平响应法是一种无需解谱即可得到辐射能流的快速求解方法,其基本思路就是将谱仪所有通道的响应使用最小二乘法拼凑成一个平响应探测器。

我们采用蒙特卡罗方法^[19]编制了数值计算程序,利用 20090521017 发实验获得的信号波形对辐射温度 T_r 不确定度进行了仔细分析. 首先评估出各单项参数不确定度对 T_r 的影响,然后对所有不确定度来源项添加随机噪声综合评估出 T_r 测量总的

确定度.

经实际考察光阑安装角度最大不确定度为 5° , 假定每道角度变化分布遵从正态分布, 仅考虑光阑安装误差得出的 T_r 不确定度约为 0.1 eV ; 根据 2009 年度滤片厚度标定结果, 其厚度标定不确定度约 1% , 仅考虑滤片厚度误差得出的 T_r 不确定度约为 0.4 eV ; 由 2009 年度平面镜标定结果和各能点标定不确定度随机生成平面镜反射效率曲线, 仅考虑平面镜反射效率误差得出的 T_r 不确定度约为 0.7 eV ; 由 2009 年度 XRD 标定结果和各能点标定不确定度随机生成 XRD 探测器灵敏度曲线, 仅考虑 XRD 灵敏度误差得出的 T_r 不确定度约为 0.6 eV ; 各道信号时间对齐精度最大误差为 100 ps , 由此带来的 T_r 不确定度为非对称性约 $(-1.5 \text{ eV}, 1 \text{ eV})$; 从示波器检定报告得知示波器信号不确定度最大为 2% , 实际打靶时示波器受电磁干扰等影响, 信号幅度不确定度取 10% 作估计, 由此带来的 T_r 不确定度约为 1.1 eV .

最后在程序中综合考虑了所有 T_r 不确定度来源项. 根据精密标定获得的每道滤片厚度、平面镜反射率、XRD 探测器灵敏度的不确定度耦合计算出每道总响应曲线每个能点的不确定度, 每个能点按正态分布随机取值, 同时考虑准直光阑尺寸不确定度, 电缆衰减系数、衰减器倍数、示波器测量精度的不确定度, 每道信号同步不确定度, 每道均按正态分布随机采样, 将添加了随机噪声的参数代入数值解谱程序, 反复解谱计算, 积累数据. 针对 20090521017 发实验数据, 综合考虑了所有来源项误差之后采用蒙特卡罗方法 1000 次抽样得出的辐射温度 T_r 分布图如图 3 所示. 统计 T_r 分布规律, 置信度 68% 的 T_r 的上下限为辐射温度 $K=1$ 的相对不确定度; 置信度 95% 的 T_r 的上下限为辐射温度 $K=2$ 的相对不确定度.

由于各参数对辐射温度 T_r 的影响并不都是对称的, 导致最终辐射温度分布不是高斯分布. 改变计算方法重复上述评估过程. 采用“三次样条基函数 LevenBerg-Marquardt 方法”的计算方法得到的不确定度与“等效平响应方法”得到的不确定度相当. 等效平响应的系统偏差和软 X 射线能谱的均匀程度有关, 在这个算例中系统偏低约 0.7% . 考虑 SXS 能道数和计算方法对辐射温度影响之后, 目前在辐射温度大于 140 eV 条件下由 14 道 SXS 谱仪获得的辐射温度测量相对不确定度约 3% ($K=1$).

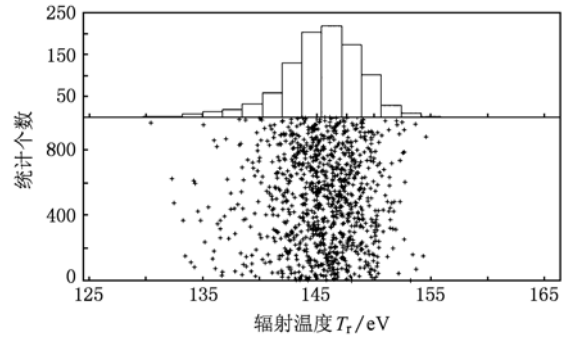


图 3 采用蒙特卡罗方法 1000 次抽样得出的 T_r 分布统计图

4. 激光打靶条件和实验安排

4.1. 靶参数

在本实验中设计了两种柱型腔靶. 第一种为原型运输腔, 腔直径 $\Phi 1.0 \text{ mm}$, 腔长度 2.1 mm , 简称为 $\Phi 1.0 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$, 腔两端激光注入孔 (LEH) 为 $\Phi 0.6 \text{ mm}$, 腔壁材料为 $25 \mu\text{m}$ 厚的金, 在柱腔壁上中间位置开矩形诊断孔 $600 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, 部分发次诊断孔上贴三台阶冲击波样品, Al 基底厚度为 $25 \mu\text{m}$, Al 台阶处厚度为 $40 \mu\text{m}$, Cu 样品厚度 $15 \mu\text{m}$, Cu 样品紧贴在 Al 基底上; 部分发次贴双台阶 Al 样品, Al 基底厚度为 $25 \mu\text{m}$, Al 台阶处厚度为 $40 \mu\text{m}$. 第二种为神光 II 运输腔, $\Phi 0.8 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$, LEH $\Phi 0.38 \text{ mm}$, 矩形诊断孔 $500 \mu\text{m} \times 400 \mu\text{m}$, 孔上贴双台阶 Al 冲击波样品, Al 台阶厚度 $35 \mu\text{m}$ 和 $55 \mu\text{m}$.

靶上设计了专门屏蔽杂散光的屏蔽筒, 其长度为 10 mm , 锥角 30° , 其目的是避免散射光入射到冲击波样品上进入光学条纹相机的视场范围而给测量带来干扰. 靶杆黏贴在屏蔽锥上.

4.2. 激光参数

八束激光分别相对柱腔轴线成 45° 角从腔靶左右两端激光注入口进入腔内, 每束三倍频激光能量约 260 J , 激光注入率大于 90% , 波形为 1 ns 方波. 对 $\Phi 0.6 \text{ mm}$ 注入孔八束激光聚焦注入, 对 $\Phi 0.38 \text{ mm}$ 注入孔激光离焦 0.4 mm 注入.

4.3. 诊断设备排布

腔靶结构和探测器排布示意图见图 4 所示, 腔靶位于真空靶室中央, 实际的腔靶几何尺寸很小,

为了便于说明在示意图中腔靶尺寸人为放大. 本实验主要诊断设备为扫描光学高温计^[20] (SOP)和三台七道软 X 射线能谱仪(SXS), 辐射温度采用软 X 射线能谱仪和冲击波法同时测量, 相互比较、相互印证.

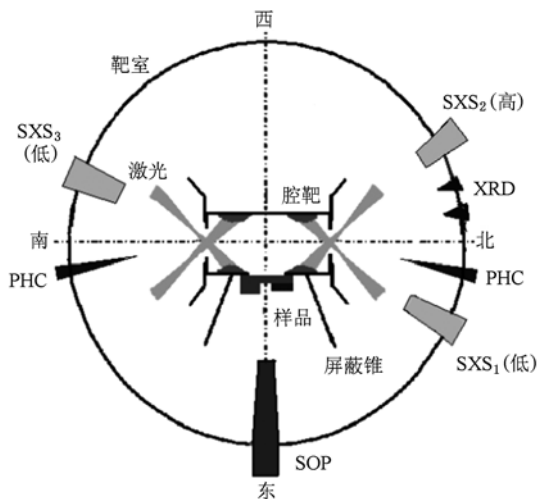


图4 腔靶结构和靶室水平区域探测器排布示意图

SOP 由成像系统 (Cassegrain 望远镜, 空间放大倍数为 10 倍) 和光学条纹相机 (OSC) 组成, 其时间分辨约为 5 ps, 空间分辨约为 10 μm , SOP 安装在靶室水平面上沿着腔靶方形诊断口方向测量台阶样品背侧可见光信号的时空分辨图像, 从而给出冲击波传播速率.

三台七道 SXS 谱仪均采用 5 m 快信号短电缆加 6G Lecroy 示波器记录 XRD 输出信号波形. 由于神光 II 真空靶室直径约 1.5 m, 神光 III 原型靶室直径约 2.4 m, SXS 谱仪为定焦设备, 所以两个装置使

用的 SXS 谱仪不能直接互换. 为了使神光 II 实验与神光 III 原型实验获得的数据可以比较, 将神光 III 原型实验的 14 道 SXS 谱仪分成两个七通道小谱仪分别安装在神光 II 靶室水平北偏东 30° (SXS₁) 和北偏西 30° (SXS₂) 位置, 其中 SXS₁ 测量 X 射线谱低能段, SXS₂ 测量 X 射线谱高能段, 由二者合成一台 14 道 SXS 谱仪, 测量能区为 0.1—3.5 keV. 靶室南、北方向各安装一台 X 射线针孔相机 (PHC) 监测激光注入情况.

5. 实验结果与分析

由合成的 14 道 SXS 谱仪获得的原型输运腔 ($\Phi 1.0 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$, LEH $\Phi 0.6 \text{ mm}$) 时间分辨辐射温度 $T_r(t)$ 曲线见图 5. 在合成的 14 道谱仪中前九道装有平面镜, 后五个高能道没有安装平面镜. 由于该 SXS 谱仪相关部件均进行过精密标定, 因此

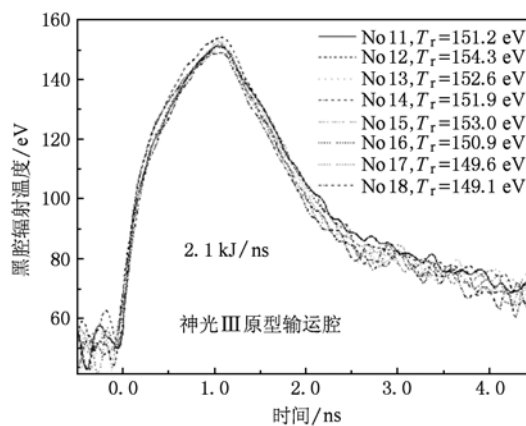


图5 合成的 14 道 SXS 谱仪给出的原型输运腔 $T_r(t)$ 曲线

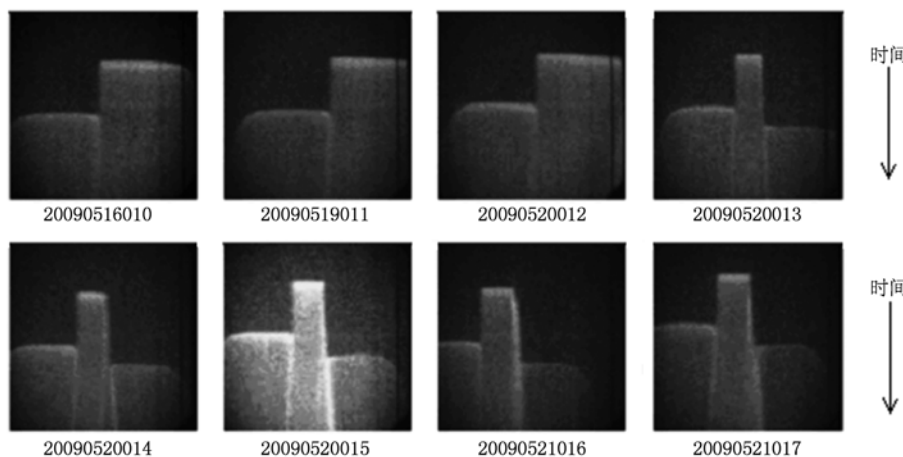


图6 由 C1587 相机获得的原型输运腔冲击波图像

由 14 道 SXS 谱仪获得的 T_r 精度较高, T_r 测量相对不确定度约 3%. 从图 5 看出, 在三倍频激光能量约 2.1 kJ、脉宽 1 ns 条件下, 对于原型输运腔, 由合成的 14 道 SXS 谱仪给出的峰值辐射温度为 149—154 eV.

图 6 给出了本单位 C1587 老相机获得的原型输运腔冲击波图像, 时间扫描方向从上至下, 从左至右为空间方向, 每幅图像下面标明了打靶编号, 最后三位数值为打靶发次号. C1587 相机采用新 1024 × 1024 CCD 记录冲击波信号, CCD 每个像元较小约 13 μm, 2 ns 档平均扫描速度为 1.5 ps/pixel. 第 010 发至 012 发为双台阶 Al 样品冲击波图像, 第 013 发至 017 发为 Al, Cu 三台阶冲击波图像, Cu 样品冲击波发光图像位于每幅冲击波图像的右侧. 加载 Cu 样品的主要目的是检验 Al 样品冲击波速度测量精度.

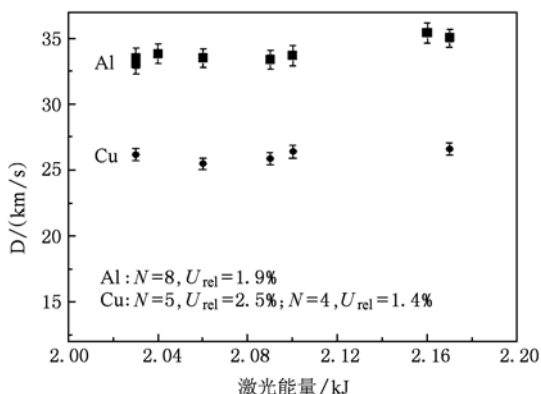


图 7 铝铜阻抗匹配方法获得的 Al, Cu 样品冲击波速度

图 7 给出了铝铜阻抗匹配方法获得的所有实验发次 Al, Cu 样品冲击波速度 D , 横坐标为靶面激光总能量, 图中方块图形为 Al 样品冲击波速度, 圆形为 Cu 样品冲击波速度. 按照 (1) — (5) 式进行数据处理, 发与发之间冲击波速度比较稳定, 八发 Al 样品冲击波速度统计偏差的均方根值为 1.9%, 五发 Cu 样品冲击波速度统计偏差均方根值为 2.5%. 利用图 7 中的实验数据作平均处理, Cu 样品冲击波速度与 Al 样品冲击波速度平均比值为 0.769, 与理论上 Cu, Al 冲击波速度比值约 0.75 十分接近, 这说明 Al 样品冲击波速度测量结果是可信的.

图 8 给出了 2009 年度在神光 II 装置上获得的不同激光能量条件下的原型输运腔辐射温度, 图中方块图形为根据 C1587 相机获得的 Al 样品冲击波速度按 (6) 式计算给出的等效峰值辐射温度, 五星

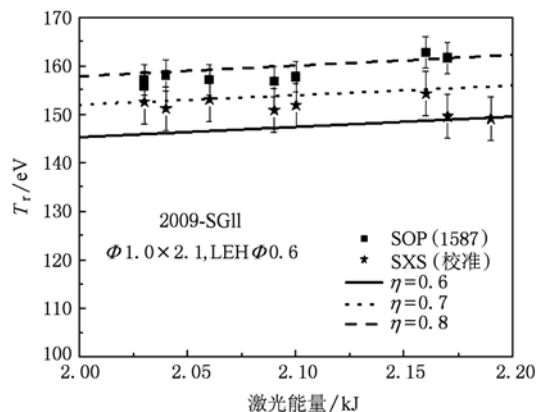


图 8 原型输运腔 T_r 与激光能量之间的定标关系

图形为合成 14 道 SXS 谱仪获得的辐射温度, 发与发之间辐射温度 T_r 比较稳定, 八发由 Al 样品冲击波速度获得的 T_r 统计偏差均方根值为 1.5%, 八发 SXS 谱仪获得的 T_r 统计偏差均方根值为 1.1%.

对于大腔而言, 靶面激光功率密度较低, 激光等离子体非线性效应、超热电子^[21]、腔内等离子体移动效应和金 M 带份额均较弱, 从而可以简化物理因素, 可以加深我们对激光腔靶耦合过程的物理理解.

在图 8 中还画出了利用功率平衡定标关系^[22,23]式获得的激光腔靶能量耦合效率 η 为 0.6, 0.7 和 0.8 的计算曲线. 这里所用的功率平衡关系式为

$$\eta P_L = (A_w(1-r) + A_h)\sigma T_r^4, \quad (7)$$

$$r = 1 - 0.34 T_r^{-0.65} \cdot \tau^{-0.41}, \quad (8)$$

其中 T_r 是腔内辐射温度, P_L 为激光功率, η 为激光腔靶能量耦合效率, A_w 为腔壁内表面积, A_h 为腔靶开口部分面积. r 为腔壁材料 X 射线反照率, 是辐射温度、激光脉宽的隐形函数, $\sigma = 1.03 \times 10^5 \text{ W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{eV}^4)$ 为斯提芬玻尔兹曼常量.

图 9 给出了 2008 年度和 2009 年度在神光 II 装置上获得的输运腔 ($\Phi 0.8 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$, LEH $\Phi 0.38 \text{ mm}$) 辐射温度. 图中方块图形和圆形十字叉图形分别为 2008 年度和 2009 年度根据 C1587 相机测得的 Al 样品冲击波速度获得的等效峰值辐射温度, 方块十字叉图形为 2009 年度利用上海 11 所新相机测得的 Al 样品冲击波速度获得的等效峰值辐射温度, 五星图形为 2009 年度利用合成的 14 道 SXS 谱仪测得的辐射温度, 图中同时画出了利用功率平衡定标关系式获得的耦合效率 η 为 0.7, 0.8 和

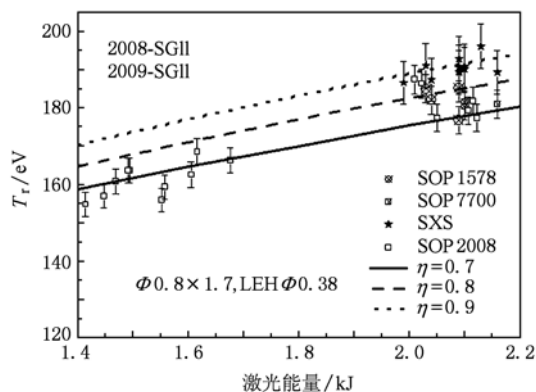


图9 神光II输运腔 T_r 与激光能量之间的定标关系

0.9 的计算曲线.

实验前利用中物院上海 11 所测量仪器对部分冲击波样品的厚度进行了抽查,对于同一块冲击波样品,中物院上海 11 所给出的厚度值与中物院激光聚变研究中心二部测量结果是一致的,在 Al 样品厚度约 20 μm 时,二者最大偏差约为 0.1 μm ,从图 9 可以看出 11 所新相机和 C1587 老相机获得的冲击波速度在不确定度范围内是一致的,这说明利用 C1587 老相机获得的冲击波速度是可靠的.

由图 8 和图 9 得知,对于神光 II 输运腔,在激光能量 2.1 kJ、脉宽 1 ns 条件下,由软 X 射线能谱仪给出的辐射温度 T_r (SXS) 约为 190 eV,由冲击波测温给出的 T_r (SOP) 约为 180 eV;对于原型输运腔,在 2.1 kJ, 1 ns 条件下, T_r (SXS) 约为 150 eV, T_r (SOP) 约为 155 eV. 按照功率平衡计算,采用冲击波测温结果得出神光 II 装置激光腔靶能量耦合效率 η 值约为 75%. 这里所说的激光腔靶能量耦合效率是指激光注入效率、激光吸收效率和 X 射线转换效率三个效率的乘积.

根据实验获得的时间分辨辐射温度曲线 $T_r(t)$ 拟合出辐射温度随时间 t 上升指数 p 值,对于原型输运腔 $p=0.22$,对于神光 II 输运腔 $p=0.28$,中物院九所四室蓝可、李欣、以及本单位杨冬等人利用 p

值、HR 模型^[24]和能量平衡假设^[25]推出神光 II 装置激光腔靶能量耦合效率 η 值约为 70%.

6. 结 论

利用北京同步辐射源新建立的 4B7B 束线完成了 14 道 SXS 谱仪滤片、X 射线平面镜和 XRD 探测器灵敏度的精密标定,获得了具有较高置信度的滤片透过率曲线、平面镜反射率曲线和 XRD 灵敏度曲线.

在实验过程中严格控制靶参数和激光参数,获得了可重复的冲击波数据,并与标定后的 SXS 给出了自洽的辐射温度. 对于神光 II 输运腔 ($\Phi 0.8 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$, LEH $\Phi 0.38 \text{ mm}$), 在 2.1 kJ, 1 ns 条件下, 由 SXS 谱仪给出的辐射温度 T_r (SXS) 约为 190 eV, 由 SOP 给出的 T_r (SOP) 约为 180 eV; 对于原型输运腔 ($\Phi 1.0 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$, LEH $\Phi 0.6 \text{ mm}$), 在 2.1 kJ, 1 ns 条件下, T_r (SXS) 约为 150 eV, T_r (SOP) 约为 155 eV. 配合理论分析,初步获得了 1 ns 激光腔靶能量耦合效率 η ,按功率平衡计算 η 值约为 75%,按能量平衡计算 η 值约为 70%.

通过精密标定和多种改进措施之后,实现了软 X 射线能谱仪初步精密化,基本建立了辐射温度精密诊断能力,采用蒙特卡罗抽样方法建立了辐射温度测量不确定度评估程序. 黑腔辐射温度测量相对不确定度由过去的约 8% 降低到目前的约 3% ($K=1$),SXS 初步精密化之后给出的辐射温度 T_r 比精密化之前给出的 T_r 约高 10%. 通过精密标定和该轮物理实验研究提高了辐射温度的可信度,使我们对过去实验结果有了进一步的认识,加深了对激光腔靶耦合过程的物理解.

本文工作得到了中国科学院高能物理研究所崔明启、赵屹东、郑雷,中物院九所裴文兵、古培俊、蓝可、郑无敌、李永升、吴畅书,中物院 11 所傅思祖、黄秀光、吴江以及上海神光 II 激光装置运行组人员的大力配合,在此表示衷心感谢.

[1] Lindl J D 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
 [2] Lindl J D, Amend P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasmas* **11** 339
 [3] Cavailler C 2005 *Plasma Phys. Control. Fusion* **47** B389
 [4] Zhang F Q, Li Z H, Xu Z P, Xu R K, Yang J L, Guo C, Xia G X, Chen J C, Song F J, Ning J M, Wang Z, Xue F B, Li L B, Qin Y, Ying C T, Liu G J 2006 *Chin. Phys.* **15** 2058
 [5] Liu Z J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 075201
 [6] Hou L F, Li F, Yuan Y T, Yang G H, Liu S Y 2010 *Acta Phys.*

- Sin.* **59** 1137 (in Chinese) [侯立飞、李芳、袁永腾、杨国洪、刘慎业 2010 物理学报 **59** 1137]
- [7] 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) [孙可熙、黄天暄、丁永坤、易荣清、江少恩、崔延莉、汤小青、陈久森、张保汉、郑志坚 2002 物理学报 **51** 1750]
- [8] Campbell K M, Weber F A, Dewald E L, Glenzer S H, Landen O L, Turner R E, Waide P A 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 3768
- [9] Kauffman R L, Kornblum H N, Phillion D W, Darrow C B, Laslinski B F, Suter L J, Theissen A R, Wallace R J, Ze F 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 678
- [10] Yang D, Wang Z B, Liu Y G, Peng X S, Jiang X H, Zhu T, Li Z C, Zhang X D, Wang L W, Li S W, Liu S Y, Ding Y K 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 694 (in Chinese) [杨冬、王哲斌、刘永刚、彭晓世、蒋小华、朱托、李志超、张小丁、王丽伟、李三伟、刘慎业、丁永坤 2009 强激光与粒子束 **21** 694]
- [11] Fu S Z, Huang X G, Wu J, Wang R R, Ma M X, He J H, Ye J J, Gu Y 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1877 (in Chinese) [傅思祖、黄秀光、吴江、王瑞荣、马民勋、何钜华、叶君建、顾援 2003 物理学报 **52** 1877]
- [12] Huang X G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6394 (in Chinese) [黄秀光 2010 物理学报 **59** 6394]
- [13] Jiang S E, Li S W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8440 (in Chinese) [江少恩、李三伟 2009 物理学报 **58** 8440]
- [14] Li S W, Yi R Q, Jiang X H, He X A, Chui 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]
- [15] Yi R Q, Yang G H, Cui Y L, Du H B, Wei M X, Dong J J, Zhao Y D, Cui M Q, Zheng L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6287 (in Chinese) [易荣清、杨国洪、崔延莉、杜华冰、韦敏习、董建军、赵屹东、郑雷 2006 物理学报 **55** 6287]
- [16] Chen B L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7078 (in Chinese) [陈伯伦 2010 物理学报 **59** 7078]
- [17] Fehl D L, Stygar W A, Chandler G A, Cuneo M E, Ruiz C L 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 103504
- [18] He X A, Jiang S E, Yi R Q 2009 *High Power Laser and Particle Beams* **21** 685 (in Chinese) [何小安、江少恩、易荣清 2009 强激光与粒子束 **21** 685]
- [19] Donald G S, Nelson M H 1985 *Rev. Sci. Instrum.* **56** 809
- [20] Jiang S E, Li W H, Sun K X, Jiang X H, Liu Y G, Cui Y L, Chen J S, Ding Y K, Zheng Z J 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3424 (in Chinese) [江少恩、李文洪、孙可熙、蒋小华、刘永刚、崔延莉、陈久森、丁永坤、郑志坚 2004 物理学报 **53** 3424]
- [21] Qi L Y, Jiang X H, Zhao X W, Li S W, Zhang W H, Li C G, Zheng Z J, Ding Y K 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 492 (in Chinese) [祁兰英、蒋小华、赵雪薇、李三伟、张文海、李朝光、郑志坚、丁永坤 2000 物理学报 **49** 492]
- [22] Hinkel D E, Schneider M B, Young B K, Langdon A B, Williams E A, Rosen M D, Suter L J 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 195001
- [23] Dewald E L, Rosen M, Glenzer S H, Suter L J, Girard F, Jadaud J P, Schein J, Constantin C, Wagon F, Huser G, Neumayer P, Landen O L 2008 *Phys. Plasmas* **15** 072706
- [24] Hammer J H, Rosen M D 2003 *Phys. Plasmas* **10** 1829
- [25] Neumayer P, Berger R L, Callahan D, Divol L, Froula D H, London R A, MacGowan B J, Meezan N B, Michel P A, Ross J S, Sorce C, Widmann K, Suter L J, Glenzer S H 2008 *Phys. Plasmas* **15** 056307

Quantitative study of radiation temperature for gold hohlraum on SG- II laser facility*

Li San-Wei[†] Song Tian-Ming Yi Rong-Qing Cui Yan-Li Jiang Xiao-Hua

Wang Zhe-Bin Yang Jia-Min Jiang Shao-En

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

(Received 15 March 2010; revised manuscript received 26 July 2010)

Abstract

Hohlraum radiation temperature is an important parameter for inertial confinement fusion (ICF) research. Experimental measurements of radiation temperature by a streaked optical pyrometer and a soft X-ray spectrometer (SXS) with 14 absolutely calibrated channels are performed on SG-II laser facility, which shows that the results of the two methods agrees with each other well. With 2.1 kJ laser energy and 1 ns pulse width, the hohlraum radiation temperatures for small hohlraum ($\Phi 0.8 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$, LEH $\Phi 0.38 \text{ mm}$) and large hohlraum ($\Phi 1.0 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$, LEH $\Phi 0.6 \text{ mm}$) are 180 eV and 150 eV, respectively. Using a sampling-based method (Monte Carlo), an uncertainty analysis program-package is set-up for SXS. After precise calibration and improvements for several components in SXS, the relative uncertainty of radiation temperature is significantly reduced from 8% to 3%.

Keywords: radiation temperature, shock-wave velocity, Monte Carlo, relative uncertainty

PACS: 52.70.La, 52.70.-m, 52.65.Pp, 52.35.Tc

* Project supported by the Foundation of High Technology Research and Development Plan of China.

[†] E-mail: lisanwei@sohu.com, or lisanwei@mail.ru