

神光 III 原型 1 ns 激光驱动黑腔辐射温度实验研究^{*}

李三伟^{1†} 易荣清¹⁾ 蒋小华¹⁾ 何小安¹⁾ 崔延莉¹⁾ 刘永刚¹⁾ 丁永坤¹⁾ 刘慎业¹⁾
蓝可²⁾ 李永升²⁾ 吴畅书²⁾ 古培俊²⁾ 裴文兵²⁾ 贺贤士²⁾

1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 621900)

2) 北京应用物理与计算数学研究所 北京 100088)

(2008 年 7 月 7 日收到 2008 年 7 月 30 日收到修改稿)

在神光 III 原型装置上, 利用八束三倍频激光注入金柱腔靶, 开展了光学高温计与软 X 射线能谱仪测量辐射温度的比对研究, 利用功率平衡关系式, 分析了神光 III 原型 1 ns 内爆标准腔、1 ns 输运腔的辐射温度与激光功率的关系, 得到了两种腔靶 X 射线转换效率(耦合效率)约为 50%—55%.

关键词: 辐射温度, 冲击波, 黑腔靶, 激光靶耦合效率

PACC: 5225, 5240, 5270L

1. 引 言

利用高功率激光器、强流粒子束和 Z-箍缩发生器等大型装置可以在实验室产生极高能量密度的物质, 从而允许我们详细地探索逼近天体物理学系统状态下的物理现象, 提供关于流体力学混合、冲击现象、辐射流、辐射不透明度、高马赫数射流、状态方程、相对论等离子体等方面的实验数据, 这些数据可以校验超新星研究、惯性约束聚变(ICF)和国防应用中使用的数值模拟程序. 在这些研究中常常需要建立类似黑体辐射的高温 X 射线辐射源^[1, 2].

在 ICF 研究中通常依靠黑腔把入射激光转换成 X 射线, X 射线辐射在腔壁约束下, 经过多次吸收和再发射, 把能量运输到整个空腔内表面并产生光学厚的高温等离子体环境, 该环境使辐射场在空间均匀化, 并渐近热力学平衡, X 射线能谱逼近黑体辐射的 Planck 谱. 然后利用可控高温 X 射线辐射源对高能密度物理(HEDP)的一些基本环节进行实验研究^[3-6], 例如辐射输运, 辐射流体力学, 流体力学不稳定性, 核反应动力学等等. 因此高温黑腔辐射源研究是内爆物理、辐射输运和流体力学不稳定性等研究的基础.

高温黑腔辐射源特性一方面依赖于激光参数,

另一方面依赖于黑腔结构, 当新的激光器——神光 III 原型于 2006 年初步建成后, 即激光参数初步确定后, 需要通过一系列的激光腔靶耦合实验优化激光打靶参数与黑腔靶构形和尺寸的匹配, 建立多种应用实验所需要的高温黑腔辐射源.

辐射温度是黑腔辐射源最重要的特征物理量, 是我们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. 目前辐射温度的测量通常采用两种方法: 一种方法是通过上下激光注入孔或诊断孔用软 X 射线能谱仪(SXS)直接测量腔内辐射温度^[7-10]; 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定标关系式给出腔内等效辐射温度^[3, 11, 12]. 2007 年度在神光 III 原型实验中首次开展了不同实验方法测量辐射温度的一致性研究, 由于开展了三台软 X 射线能谱仪同时测量的比对、光学条纹相机全屏扫描非线性的精密标定、以及辐射温度测量不确定度的深入分析等细致工作, 使我们对辐射温度有了更进一步的认识.

2. 激光打靶条件和实验安排

在本实验中设计了两种柱型腔靶, 一种为 1 ns 输运腔, 腔直径 $\Phi 1.0$ mm, 腔长为 2.1 mm, 腔两端激光注入孔(LEH)为 $\Phi 0.7$ mm, 腔壁材料为 35 μm 厚

^{*} 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2007CB814802)资助的课题.

[†] 通讯联系人, E-mail: lisanwei@sohu.com, or lisanwei@mail.ru

的金,在柱腔壁上中间位置开矩形诊断孔 $400\ \mu\text{m} \times 600\ \mu\text{m}$,孔上贴台阶 Al 样品,Al 基底厚度为 $35\ \mu\text{m}$,台阶处厚度为 $50\ \mu\text{m}$,靶上设计了专门屏蔽杂散光的屏蔽筒,其长度有 $16\ \text{mm}$ 和 $32\ \text{mm}$ 两种,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.另外一种靶为 $1\ \text{ns}$ 内爆标准腔:腔直径 $\Phi 1.0\ \text{mm}$,腔长为 $1.7\ \text{mm}$,LEH 为 $\Phi 0.7\ \text{mm}$,腔壁材料为 $20\ \mu\text{m}$ 厚的金,在柱腔壁上中间位置开圆形诊断孔 $\Phi 0.4\ \text{mm}$.腔两端屏蔽片尺寸 $\Phi 3.0\ \text{mm}$,锥形部分长 $1.5\ \text{mm}$.

由于神光 III 原型装置上剩余基频、二倍频光要进入靶室,这些杂散光辐照到柱腔外壳和屏蔽片上产生的 X 射线辐射要干扰辐射温度(其大小由腔内辐射流强度确定)测量,根据 2006 年度磨合实验结果可知,当屏蔽片和柱腔外壳涂上 $15\ \mu\text{m}$ 厚的 CH 层与不涂 CH 层相比,杂散光产生的 X 射线信号强度下降到 $1/5\text{—}1/10$,为了降低杂散光对辐射温度测量的影响,所有腔靶屏蔽片和腔体外壳均涂 CH 层,CH 涂层厚度大于 $15\ \mu\text{m}$.另外输运腔长度要比内爆标准柱腔要长 $400\ \mu\text{m}$,其目的是为了降低激光第一打击点产生的高能 X 射线对冲击波样品的辐照,降低预热效应^[13],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.

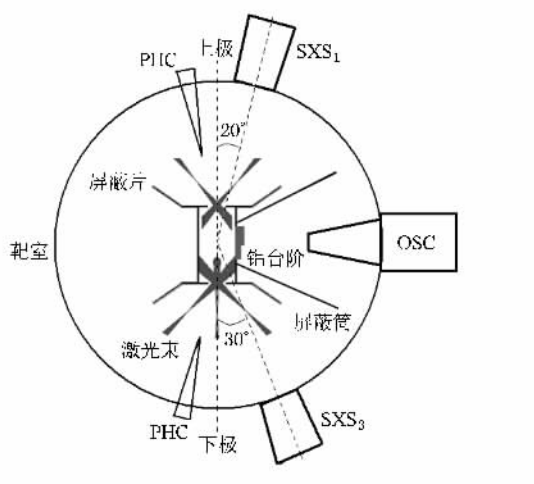


图 1 靶结构和实验探测器排布示意图

靶结构和实验探测器排布示意图如图 1 所示,腔靶位于真空靶室中央,腔轴上下竖直放置,为了便于说明在示意图中腔靶尺寸人为放大.神光 III 原型八束三倍频激光分别从上、下两个方向相对柱腔轴线成 45° 角从腔靶注入孔进入腔内,激光聚焦注入,上、下各四束激光焦点重合,焦点分别位于上、下激

光注入孔中心,上、下两环激光光路错开 45° ,激光波长 $0.35\ \mu\text{m}$,脉宽 $1\ \text{ns}$,每束激光能量 $300\ \text{J}\text{—}1\ \text{kJ}$,靶面上激光焦斑为棱形状,短对角线长度约 $300\ \mu\text{m}$,长对角线约 $420\ \mu\text{m}$,靶面激光功率密度 $4.5 \times 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2\text{—}1.5 \times 10^{15}\ \text{W}/\text{cm}^2$.

本实验主要诊断设备为扫描光学高温计^[14-16](SOP)和三台新设计加工的 15 道软 X 射线能谱仪(SXS).SOP 由成像系统(Cassegrain 望远镜,放大倍数为 10)和 979 光学条纹相机(OSC)组成,其时间分辨为 $5\ \text{ps}$,空间分辨为 $10\ \mu\text{m}$.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 Al 样品背侧可见光($300\text{—}500\ \text{nm}$)信号的时空分辨图像,从而给出冲击波传播速率.SXS₁ 号谱仪位于靶室上半球,与腔轴成 20° 的位置,通过激光上注入孔观测腔内时间分辨辐射温度,由于激光注入孔 $\Phi 0.7\ \text{mm}$ 偏大,SXS₁ 号谱仪通过两个激光注入孔少部分看穿了腔内软 X 射线发射以面发射为主,因此测得的辐射温度偏低一点.SXS₂ 号谱仪位于靶室水平面上通过诊断孔观测腔内时间分辨辐射温度.SXS₃ 号谱仪位于靶室下半球,与腔轴成 30° 的位置,通过下激光注入孔观测腔内时间分辨辐射温度,SXS₃ 号谱仪测得的辐射流基本上等效于辐照到腔中心靶丸上的辐射能流.软 X 射线能谱仪每道由 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,SXS 测谱范围为 $50\ \text{eV}\text{—}5\ \text{keV}$.另外在靶室上、下半球近极轴位置各安装一台针孔相机(PHC)对注入孔 X 射线发射进行时间积分空间成像监测,考察激光注入情况.

3. 腔靶不同方位辐射温度理论模拟

在间接驱动惯性约束聚变实验研究中,由冲击波速度通过定标关系确定辐射温度是一种常用的技术手段.在 Nova 激光装置上通过 PS22 脉冲激光注入腔内辐射驱动冲击波实验获得了 Al 样品中冲击波速度 D 与腔内峰值辐射温度 T_R 的定标关系^[4,12]

$$T_R(\text{eV}) = 0.012(D/\text{cm/s})^{0.63} \\ = 17.8(D/\text{km/s})^{0.63}. \quad (1)$$

我们的研究表明,冲击波速度与辐射温度定标关系式是与辐射驱动波形相关的.因此,针对神光 III 原型装置的辐射驱动波形,我们利用 RDMG 程序及原子参数数据库通过数值模拟给出了冲击波速

度与辐射温度定标关系式

$$T_R(\text{eV}) = 0.0091(D/\text{cm/s})^{0.647} \\ = 15.78(D/\text{km/s})^{0.647}. \quad (2)$$

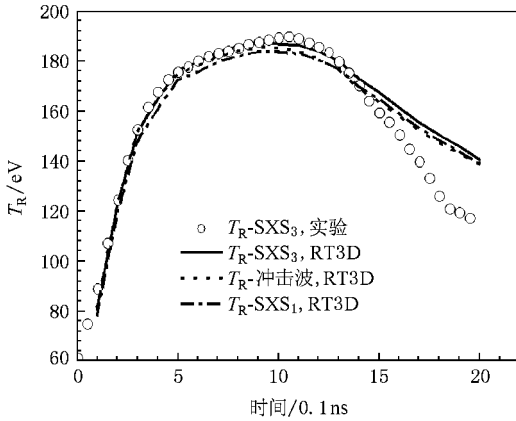


图 2 对应于 SXS 观测方向由 RT3D 模拟给出的时间分辨辐射温度曲线

同时利用 RT3D 程序对位于不同方位安装的软 X 射线能谱仪所测的辐射温度和通过冲击波样品所测的辐射温度进行了细致的模拟, 并与冲击波样品区入射流所定义的辐射温度进行了对比分析。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, 与其安装方位, 即观测角度有关。根据 RT3D 给出的图像, SXS₁ 谱仪能完整地看到一个激光光斑区以及两个光斑的一部分, 同时可以看到激光下注入孔的一小部分; SXS₂ 谱仪测得的是黑腔腰部的再发射流, 它只能看到一小部分光斑区; SXS₃ 谱仪基本上能完整地看到两个光斑区。

针对第 54 发激光波形和 1 ns 输运腔结构, 对应于不同 SXS 观测方向由 RT3D 模拟给出的时间分辨辐射温度曲线如图 2 所示, 实线为 SXS₃ 观测方向由 RT3D 模拟给出的时间分辨辐射温度曲线; 点画线为 SXS₁ 观测方向模拟结果; 虚线为由入射流定义的腔壁平均辐射温度模拟结果, 即由冲击波速度确定的辐射温度对应于此曲线峰值; 空心圆圈为 SXS₃ 谱仪测得的辐射温度时间波形。由图 2 的数值模拟结果看到, 三台谱仪中, SXS₃ 谱仪测得的辐射温度最高, 而 SXS₂ 谱仪的最低, 这是由于观测方位不同导致的; 由冲击波速度确定的峰值辐射温度介于 SXS₁ 与 SXS₂ 之间, 但更接近 SXS₃ 方位的辐射温度, 约低 2 eV。

4. 实验结果与分析

4.1. 光学条纹相机全屏扫描速度标定

由于条纹相机中晶体管的老化将导致斜坡扫描电压发生畸变, 从而改变条纹相机的扫描速度。为了提高冲击波速度测量精度, 需要对相机不同时刻、不同空间位置的扫描速度进行精密标定。

改变延迟箱的延迟时间, 并利用扫描电路的触发晃动得出不同位置的扫描条纹图。将时间轴人为划分为若干小段, 然后根据扫描条纹图及序列脉冲时间间隔求得每一小段时间间隔内的平均扫描速度。将多次测得的扫描速度加权处理后得到这一区域的平均扫描速度。

通过一组扩束器将主激光扩束后照亮整个相机狭缝, 得狭缝扫描像, 再截取不同位置的扫描图进行处理即可获得对应的扫描速度。

实验前利用短脉冲 YAG 激光器(光源波长 526 nm, 能量 6 mJ, 脉宽 30 ps)配 200 ps 光学标准具对 979 光学条纹相机全屏扫描非线性进行了仔细标定, CCD 像素为 512 × 512, 5 ns 档标定结果如图 3 所示, 横轴为扫描方向荧光屏上像素(pixel)坐标, 纵轴为荧光屏不同空间位置每个单元像素点的平均扫描速度。5 ns 档和 10 ns 档初始时刻的扫描速度明显慢于其他时刻, 扫描方向为从右向左。这说明由于条纹相机的老化, 相机扫描速度在不同时刻差别较大, 采用平均扫描速度和扫速非线性进行数据处理已不适用。

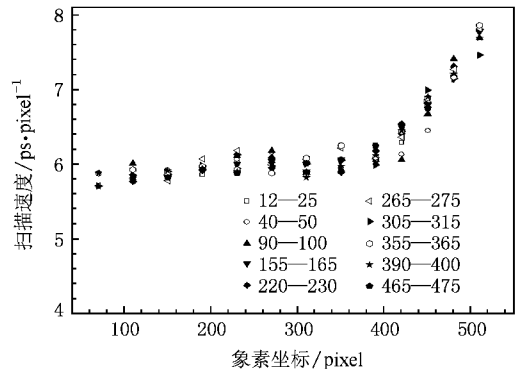


图 3 979 光学条纹相机全屏扫描非线性标定结果(5 ns 档)

4.2. 光学高温计测量辐射温度

由冲击波速度确定辐射温度, 其原理是将标准材料 Al 样品放置在腔壁诊断口上, 当 X 射线辐射在

低 Z 材料 Al 样品中被吸收时,将产生向内传播的冲击波,首先在 Al 基底中传播,然后冲击波进入 Al 台阶区(已知厚度差 Δd),利用 SOP 测量出台阶区冲击波的渡越时间 Δt ,从而给出 Al 样品中冲击波传播速度 $D = \Delta d / \Delta t$,再通过冲击波速度与驱动冲击波辐射场的辐射温度 T_R 的定标关系求出等效辐射温度.

图 4 给出了第 23 发获得的台阶 Al 样品冲击波发光图像.图像上半部份对应 Al 台阶,厚度

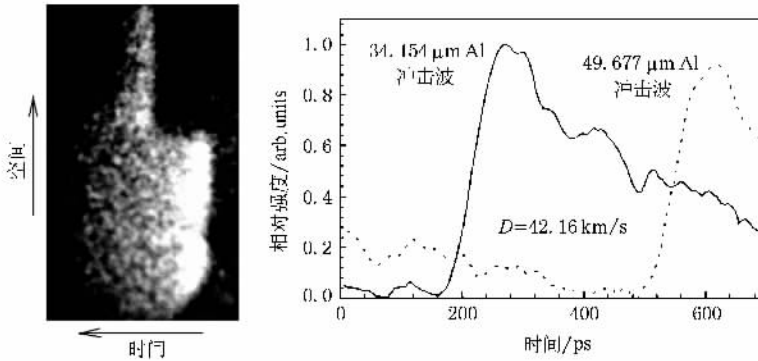


图 4 第 23 发 Al 台阶样品背侧冲击波图像和可见光强度沿时间方向扫描图

由冲击波关系式

$$D = C_0 + \lambda u, \quad (3)$$

$$P = \rho_0 D u, \quad (4)$$

得到

$$P = \rho_0 D (D - C_0) \lambda, \quad (5)$$

式中 D 为冲击波速度, u 为波阵面后的粒子速度, 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.测得冲击波速度后,可求得样品中的冲击波压力.对于 Al 样品^[17], $C_0 = 5.25$ km/s, $\lambda = 1.39$, $\rho_0 = 2.79$ g/cm³,由第 23 发得出 Al 样品中冲击波速度 $D = 42.2$ km/s,对应的冲击波压力 $P = 3.1 \times 10^{12}$ Pa.

冲击波速度测量误差主要来源有样品台阶高度的测量误差及样品表面粗糙度的影响,样品背侧冲击波发光时间拟合误差,包括条纹相机的噪声,样品非均匀性以及冲击波空间的非平面性;条纹相机的分辨率及标定误差;冲击波的衰减(即不稳定性)引起的误差,以及预热引起的样品密度变化带来的误差.实验中对冲击波速度测量不确定度进行了仔细分析,台阶厚度采用光学干涉仪测量,台阶厚度的相对不确定度约 2%,考虑光学条纹相机时间分辨、成像系统空间分辨以及狭缝宽度影响后,台阶样品处

49.677 μm ,下半部分对应 Al 基片,厚度 34.154 μm ,图像横向为时间扫描方向,纵向为空间分辨方向.图 4 右边给出了第 23 发样品背侧可见光强度沿时间方向扫描曲线,经过去本底归一化处理后得出冲击波上升沿约 80 ps,位于 979 相机荧光屏上不同空间位置的冲击波图像按标定结果图 3 分段处理,即扫描速度分段计算,考虑冲击波图像空间位置后,冲击波速度 42.16 km/s.根据关系式(2)式由冲击波速度推得腔内等效辐射温度 177.7 eV.

冲击波渡越时间相对不确定度约 5.5%;冲击波速度测量相对不确定度约 5.9%;根据(2)式得出辐射温度相对不确定度约 4%.

4.3. 软 X 射线能谱仪测量辐射温度

为了考察软 X 射线能谱仪测量结果的一致性,实验期间三台 15 道 SXS 同时安装在靶室上半球,与腔轴均成 20°的位置,三台谱仪视场完全一致,三台 SXS 测得的辐射温度曲线基本一致,SXS₁ 谱仪获得的辐射温度约高一点,约 4 eV,实验前 SXS₂ 谱仪上的 XRD 探测器在北京同步辐射源上标定过,因此其余两台谱仪实验数据按 SXS₂ 谱仪归一.正式实验期间 SXS₃ 谱仪位于靶室下半球,与腔轴成 30°的位置,通过下激光注入孔观测腔内时间分辨辐射温度.

在美国 Nova 和 Omega 装置上通常采用从激光注入口测量辐射通量而不采用通过中平面诊断孔测量辐射温度^[4].通过激光注入口方向测量腔内辐射温度,其优点在于注入口尺寸比中平面诊断口大得多,可以不考虑诊断孔缩孔效应,而且注入口附近的稀薄等离子体通过激光加热温度较高,对腔内发射的 X 射线更透明.通过激光注入口获得的辐射通量包含了激光加热光斑和激光未辐照腔壁再发射的通

量, 选择恰当的观察方向能够等效于辐照到腔中心靶丸上的辐射能流。

图 5 给出了典型的 1 ns 内爆标准腔靶辐射温度时间波形。在激光脉冲(激光能量 7.7 kJ, 脉宽 1 ns)作用期间, SXS₃ 谱仪获得的激光注入孔辐射温度时间过程 $T_R(\text{LEH})$ 和 SXS₂ 谱仪获得的诊断孔辐射温度时间过程 $T_R(\text{DH})$ 与激光脉冲(Laser)基本是同步的, 说明在激光脉冲结束前腔内没有出现明显的等离子体堵腔效应。

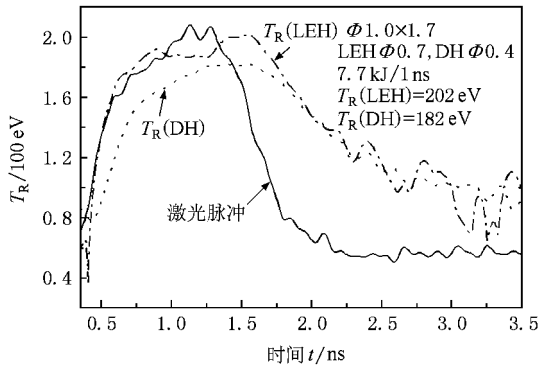


图 5 1 ns 内爆标准腔辐射温度时间波形

目前 SXS 谱仪数据处理采用积分辐射流^[18]的方法给出辐射温度, 积分能区取 50 eV—4.1 keV。积分区间高能截止点选择越低, 给出的辐射温度越高, 当高能截止点大于 4.1 keV 时, 给出的辐射温度趋向稳定。

时间分辨辐射温度不确定度的主要来源有 XRD 探测器灵敏度的不确定度、平面镜反射率的不确定度、平面镜安装角度的不确定度、滤片透过率的不确定度、探测器的立体角因子的不确定度、信号电缆和衰减头的衰减系数不确定度、示波器的测量不确定度以及数据处理不确定度等。目前 X 射线辐射功率测量不确定度约 30.5%, 辐射温度相对不确定度 7.5%。

表 1 SOP 测温 and SXS 测温比较(输运腔)

发次号	激光总能量/J	T_{R-SXS}/eV	$D/km \cdot s^{-1}$	$T_{R-Shock}/eV$
8-27-18	5363	183 ± 14	43.7 ± 2.6	181.8 ± 6.9
8-28-23	4500	175 ± 13	42.2 ± 2.5	177.7 ± 6.7
8-29-27	4717	176 ± 13	41.7 ± 2.5	176.4 ± 6.7

考虑冲击波图像空间位置后, 同一发打靶 SOP 测温结果 $T_{R-Shock}$ 和 SXS₃ 测温结果 T_{R-SXS} 基本一致, 即两种测量原理完全不同的设备得到的结果基本一

致, 见表 1 所示, 与理论模拟结果相符合, 说明目前辐射温度测量是可信的。

4.4. 1 ns 腔靶辐射温度定标关系

在固定激光功率条件下辐射温度主要依赖于腔壁漏失和 X 射线转换效率。图 6 和图 7 分别给出了神光 III 原型 1 ns 标准腔、1 ns 输运腔辐射温度与激光功率之间的定标关系。图中不同 X 射线转换效率 η 曲线按功率平衡关系式^[4]

$$\eta P_L = (A_w(1 - \alpha) + A_h)\sigma T_R^4 \quad (6)$$

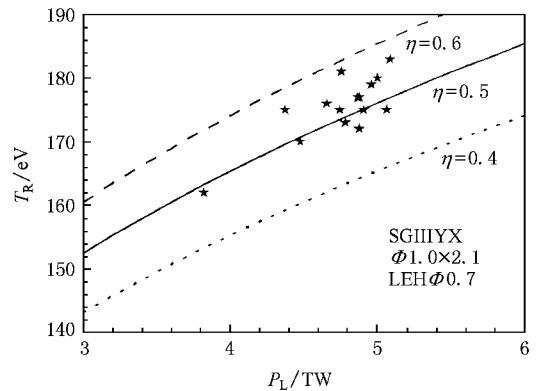


图 6 神光 III 原型 1 ns 输运腔辐射温度与激光功率定标关系

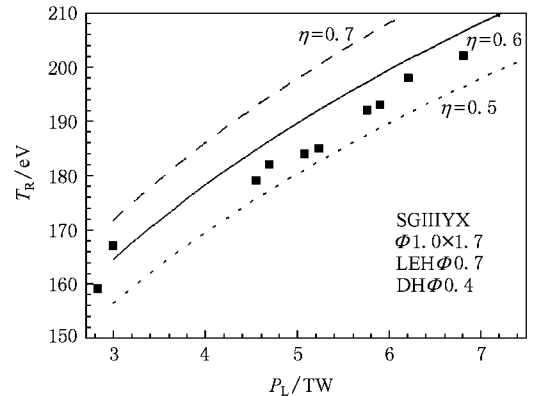


图 7 神光 III 原型 1 ns 标准腔辐射温度与激光功率定标关系

计算给定, 其中 T_R 是腔内辐射温度, P_L 为激光功率, η 为激光—X 射线转换效率, A_w 为腔壁内表面积, A_h 为腔靶开口部分面积, α 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。我们利用 RDMG 程序的数值模拟结果给出了金材料的反照率 $\alpha = 1 - 0.34 T_R^{-0.65} \cdot \tau^{-0.41}$, 这与文献^[19]给出的结果是一样的。在图 6 中黑五星和图 7 中黑方块符

号分别为 SXS₃ 谱仪获得的 1 ns 输运腔、1 ns 标准腔靶辐射温度实验数据,由图 6 和图 7 得出神光 III 原型 1 ns 输运腔、1 ns 内爆标准腔 X 射线转换效率(耦合效率)分别约为 50% 和 55%。

5. 结 论

本文研究了不同实验方法测量辐射温度的一致性. 实验数据分析表明在同一发打靶实验中,光学高温计测温结果和软 X 射线能谱仪测温结果基本一致,与理论模拟结果相符合. 在此基础上获得了神光 III 原型 1 ns 内爆标准腔、1 ns 输运腔辐射温度定标关系,给出了 1 ns 输运腔、1 ns 内爆标准腔 X 射线转换效率分别约为 50% 和 55%. 本文描述的 1 ns 激光驱动黑腔辐射温度实验数据给未来辐射烧蚀、内爆

物理、辐射输运等实验研究奠定了良好基础.

由于目前神光 III 原型激光束质量原因,腔靶两端激光注入孔(目前直径 $\Phi 0.7$ mm)偏大,腔内辐射流漏失严重,辐射温度偏低,同时腔内辐射场 P_2 不对称性增大,靶丸内爆压缩度变低. 考虑激光注入条件、激光能量耦合效率和黑腔对称性后激光注入孔直径通常为腔直径的二分之一,对神光 III 原型典型黑腔而言,腔直径为 $\Phi 1$ mm,因此较理想的激光注入孔直径为 $\Phi 0.5$ mm,即光束质量有待改进.

神光 III 原型黑腔物理实验是在中国工程物理研究院激光聚变研究中心三部、二部、五部、四部、一部、以及北京应用物理与计算数学研究所四室相关人员的协作下共同完成的,在此向他们表示感谢!同时对有关领导、专家的指导帮助,以及对所各职能部门的组织协调作用表示感谢!

- [1] Drake R P 2006 *High Energy Density Physics* (New York :Springer) p335
- [2] Campbell E M ,Hogan W J 1999 *Plasma Phys . Control . Fusion* **41** B39
- [3] Lindl J D 1995 *Phys . Plasmas* **2** 3933
- [4] Lindl J D ,Amendt 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
- [5] Cavailler C 2005 *Plasma Phys . Control . Fusion* **47** B389
- [6] Rothman S D ,Evans A M ,Horsfield C J ,Graham P ,Thomas B R 2002 *Phys . Plasmas* **9** 1721
- [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] Sun K X ,Jiang S E ,Yi R Q ,Cui Y L ,Ding Y K ,Liu S Y 2006 *Acta Phys . Sin .* **55** 68 (in Chinese)[孙可熙、江少恩、易荣清、崔延莉、丁永坤、刘慎业 2006 物理学报 **55** 68]
- [9] 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
- [10] Dewald E L ,Landen O L ,Suter L J ,Schein J ,Holder J ,Campbell K , Glenzer S H ,McDonald J W ,Niemann C ,Mackinnon A J ,Schneider M S ,Haynam C ,Hinkel D ,Hammel B A 2006 *Phys . Plasmas* **13** 056315
- [11] Kauffman R L ,Kornblum H N ,Phillion D W ,Darrow C B ,Lasinski B F ,Suter L J ,Theissen A R ,Wallace R J ,Ze F 1995 *Rev . Sci . Instrum .* **66** 678
- [12] Kauffman R L ,Suter L J ,Darrow C B ,Kilkenny J D ,Kornblum H N , Montgomery D S ,Phillion D W ,Rosen M D ,Theissen A R ,Wallace R J ,Ze F 1994 *Phys . Rev . Lett .* **73** 2320
- [13] 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]
- [14] 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]
- [15] Oertel J A ,Murphy T J ,Berggren R R 1999 *Rev . Sci . Instrum .* **70** 803
- [16] Olson R E ,Leeper R J ,Nobile A ,Oertel J A ,Chandler G A , Cochrane K ,Dropinski S C ,Evans S ,Haan S W ,Kaae J L ,Knauer J P ,Lash K ,Mix L P ,Nikroo A ,Rochau G A ,Rivera G ,Russell C , Schroen D ,Sebring R J ,Tanner D L ,Turner R E ,Wallace R J 2004 *Phys . Plasmas* **11** 2778
- [17] Peng X S ,Li S W ,An Z ,Jiang X H ,Liu Y G 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **19** 741 (in Chinese)[彭晓世、李三伟、安竹、蒋小华、刘永刚 2007 强激光与粒子束 **19** 741]
- [18] Fehl D L ,Stygar W A ,Chandler G A ,Cuneo M E ,Ruiz C L 2005 *Rev . Sci . Instrum .* **76** 103504
- [19] Hammer J H ,Rosen M D 2003 *Phys . Plasmas* **10** 1829

Experimental study of radiation temperature for gold hohlraum heated with 1 ns 0.35 μm lasers on SG-Ⅲ prototype laser facility^{*}

Li San-Wei¹† Yi Rong-Qing¹ Jiang Xiao-Hua¹ He Xiao-An¹ Chui Yan-Li¹
Liu Yong-Gang¹ Ding Yong-Kun¹ Liu Shen-Ye¹
Lan Ke² Li Yong-Sheng² Wu Chang-Shu² Gu Pei-Jun² Pei Wen-Bing² He Xian-Tu²

¹ *Research Center of Laser Fusion, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

² *Beijing Institute of Applied Physics and Computation Mathematics, Beijing 100088, China*

(Received 7 July 2008 ; revised manuscript received 30 July 2008)

Abstract

Experimental measurement of radiation temperature by a streaked optical pyrometer and a soft X-ray spectrometer viewing through the laser entrance hole are performed on SG-Ⅲ prototype laser facility. It was found that the two methods compares well. Using the power balance relation the laser-hohlraum coupling efficiency for $\phi 1.0 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$ hohlraum and $\phi 1.0 \text{ mm} \times 2.1 \text{ mm}$ hohlraum is around 50%—55%.

Keywords : radiation temperature , shock wave , hohlraum , laser-hohlraum coupling efficiency

PACC : 5225 , 5240 , 5270L

^{*} Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2007CB814802).

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