

文章编号: 0253-2239(2004)10-1324-4

基频光腔靶辐射温度定标*

孙可煦 江少恩 丁永坤 黄天暄 崔延莉 汤晓青 陈久森 易荣清 郑志坚

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 高温高密度等离子体物理国家重点实验室, 绵阳 621900)

摘要: 研究腔靶辐射温度和 X 光耦合效率与靶结构及激光辐照条件的依赖关系。利用神光-II 基频光(波长 1.053 μm , 能量 3~5 kJ/8 束, 脉宽 0.6~0.9 ns)辐照金腔靶。采用软 X 光能谱仪及平响应探测器分别测量腔靶诊断口辐射 X 光功率谱及其能量角分布。同时, 利用五针孔时、空分辨成像技术对腔靶诊断口发射软 X 光进行实验观测, 给出辐射温度推算中需要的等效诊断口面积修正因子。在北京同步辐射软 X 光标定站, 对上述诊断用软 X 光探测元器件进行了全谱范围(0.05~1.5 keV)的绝对标定, 以提高 X 光辐射功率和黑腔辐射温度的诊断精度。

关键词: 原子光谱学; 基频激光; 黑腔靶; 软 X 光能谱; 堵口效应; 辐射温度

中图分类号: O562.3 文献标识码: A

Radiation Temperature Scaling for Cavity Targets with Fundamental Frequency

Sun Kexu Jiang Shaoen Ding Yongkun Huang Tianxuan Cui Yanli Tang Xiaoqin
Chen Jiusen Yi Rongqing Zheng Zhijian

(National Key Laboratory of Laser Fusion, Research Center of Laser Fusion,
The Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

(Received 22 August 2003; revised 19 December 2003)

Abstract: The dependence of radiation temperatures and coupling efficiencies of cavity targets on the target structures and laser irradiation conditions are investigated. Shenguang II fundamental-frequency laser with wavelength 1.053 μm , energy 3~5 kJ/8 beams, pulse width 0.6~0.9 ns is employed to irradiate gold cavity targets. The broadband soft X-ray spectrometer and flat response detector are used to measure the soft X-ray spectrum and its angular distribution from the diagnostic hole on cavity target. At the same time, technology of temporal and spatial resolution image with 5 pinholes is used to observe the X-rays emitted from the diagnostic hole on the cavity target, and then the correction factor of effective area of the diagnostic hole is obtained. Meanwhile, above-mentioned soft X-ray detection elements are calibrated by BSRF-3W1B beam in the region of 50~1500 eV to improve the irradiation power and diagnostic temperature.

Key words: atomic spectroscopy; fundamental frequency laser; cavity targets; soft X-ray spectrum; pinhole closure; radiation temperature

1 引 言

激光间接驱动惯性约束聚变(ICF)需要在一个优化设计的黑腔内建立高温辐射场。该辐射场不但要求温度高,而且要具有足够的对称性和均匀性,以

驱动靶丸实现内爆;同时避免超热电子和硬 X 光对靶丸的预热,降低内爆效率^[1,2]。神光 II 基频激光器是国内功率最大的驱动器。尽管仍存在超热电子的问题,但在激光功率、均匀辐照以及靶结构设计方面都比神光 I 有很大程度的提高,对于建立上述高温辐射场提供了物质基础。

10 年前,我们在神光 I 基频激光器上进行了多轮实验,以此为基础发展起来的综合诊断技术为本

* 国家 863 计划(863-416-3)资助课题。

收稿日期:2003-08-22;收到修改稿日期:2003-12-19

项目的顺利开展提供了技术保证。尽管软 X 光能谱仪谱分辨相对较低,但到目前它仍是 X 光辐射功率定量测量的可靠设备。过去 30 年里,美国洛伦斯-里弗莫尔利用这种软 X 光能谱仪作辐射场功率诊断设备,获取了大量实验数据并成功实现了与 LASNEX 数值模拟计算结果的比对^[3,4]。在国家点火装置(NIF)的诊断设备清单中它仍列为首选设备。多个分离式 X 光平响应探测器用于测量腔靶泄漏口发射 X 光的角分布,对于计算 X 光泄漏总量,推测腔内激光-X 光转换效率以及 X 光能量在腔内的再分配是必需的。

以针孔条纹相机为基础的时空分辨成像系统是研究诊断口堵口现象的有效工具。辐射烧蚀孔边缘物质,形成等离子体向孔心膨胀,造成空间光学厚度变化,使被测软 X 光谱发生畸变,这种现象被称之为堵口效应。实验观测中经常表现为 X 光时间波形变窄^[5],时空分辨成像装置观测到诊断孔通光口径收缩等现象。为了获得腔内辐射场的真实状况,必须对实验测量结果进行必要的修正。

2 激光腔靶能量平衡

2.1 激光-腔靶相互作用

初期,类似于激光-平面靶相互作用,高功率激光加热固体靶材料,靶表面薄层很快蒸发形成等离子体晕,等离子体晕的密度沿靶面法线方向呈指数衰减,并在临界密度面附近吸收激光能量。被吸收激光能量首先加热电子,电子通过热传导加热超临界密度区,产生 X 光发射。后期,最大区别是散射光不像平面靶那样流失于靶外空间,而是除少部分通过腔靶泄漏孔流失外,大部分散射光与其余腔内壁面再作用,被再次吸收,从而使腔靶的吸收效率高于平面靶。辐射转换过程,同样除少部分辐射能通过腔靶泄漏孔流失,大部分辐射能与其余腔壁再作用,再次被吸收和再辐射(这也即辐射约束作用),从而使腔靶的辐射转换效率高于平面靶。再吸收和再辐射依次循环,使辐射场趋于平衡辐射^[6],因此辐射场强度可用辐射温度 T_r 表征。

2.2 腔靶能量平衡

当激光注入腔靶时,激光与腔靶相互作用,从能量平衡出发辐射源通量有

$$S_s = \eta I_L, \quad (1)$$

式中 I_L 为注入腔内激光平均功率密度, η 为激光能量耦合系数, $\eta = \eta_i \eta_a \eta_x$, η_i 为激光腔靶注入率, $\eta_a = E_a/E_{Li}$, E_{Li} 为注入腔靶的激光能量, E_{LT} 为激光总

能量; η_a 为注入激光能量的吸收率, $\eta_a = E_a/E_{Li}$, E_a 为腔壁吸收激光能量; η_x 为腔壁吸收激光能量的 X 光转换率, $\eta_x = E_x/E_a$, E_x 为腔壁转换 X 光能量。在黑洞腔中,辐射能远小于物质能,能量主要贮存在腔壁物质中^[1],在无泄漏情况下,真空界面能量平衡有

$$S_s + S_i = S_r + S_{hw}, \quad (2)$$

式中 S_s 为能源通量, S_i 为辐射入射通量, S_r 为壁再发射通量, S_{hw} 为加热波通量。当有泄漏孔时

$$S_s + S_i = f(S_s + S_i) + (1-f)(S_r + S_{hw}), \quad (3)$$

式中 f 为孔占比,通常孔占比小于 0.1。定义腔壁再发射率: $r = S_r/S_i$;对于我们感兴趣的 X 光波段,腔壁足够厚,X 光穿不透,因此经过多次辐射、吸收、再发射循环后有

$$S_s = S_{hw} + fS_r = (1-r)S_r + fS_r, \quad (4)$$

(1)式代入(4)式,根据斯提芬-玻尔兹曼有

$$\frac{\eta \bar{I}_L}{1-r+f} = \sigma T_r^4, \quad (5)$$

$$T_r = \left[\frac{\eta \bar{I}_L}{(1-r+f)\sigma} \right]^{1/4}, \quad (6)$$

式中 σ 为斯提芬-玻尔兹曼常量, r 随界面等离子体状态变化,也即温度的隐形函数,因此(6)式不能直接估算腔壁辐射温度,但在某些特定条件下,利用此式可作温度估算。

2.3 再发射率

根据文献[7]再发射率有

$$r = 1 - (12.7 T_r^{-3/4} t_x^{-1/2}), \quad (7)$$

式中 t_x 为 X 光发射时间。根据神光装置基频光-腔靶实验数据拟合值,给出再发射率计算曲线[图 1(a)]。由图 1(a)可见,再发射率与加热时间关系密切,加热时间长,则腔壁再发射效率高。根据基频光实验经验, $t_x \approx 1.5 t_L$, t_L 为激光脉冲宽度。这里我们取 $t_x \approx 1.3$ ns 代入(6)式,获得腔靶辐射温度随激光平均功率密度关系曲线,及其对泄漏孔大小的依赖关系[图 1(b)]。由图 1(b)可见,辐射温度随泄漏孔增大而下降,但对泄漏孔的依赖性不强。特别是在目前激光辐照平均功率密度不太高的情况下,激光-腔靶注入率^[8] $\eta_i \approx (0.9 \sim 0.95)$,注入激光能量吸收率^[9] $\eta_a \approx (0.55 \sim 0.60)$,吸收能量转换率^[10] $\eta_x \approx (0.40 \sim 0.50)$,由此估算基频光腔靶能量耦合效率 $\eta \approx (0.20 \sim 0.30)$ 。根据图 1(a)中 $t_x = 1.3$ ns 的 r 计算值及腔靶泄漏孔的孔占比可能取的最大、最小值代入(6)式,可给出基频光-腔靶辐射温度计算值上限和下限[图 1(c)]。

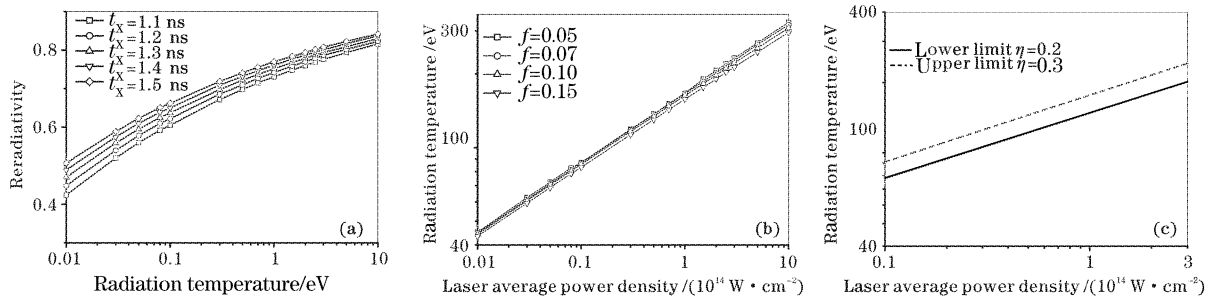


Fig. 1 The reradiativity with defferent heating time (a), the radiation temperature with different leakage hole (b), and the radiation temperature of coupling lower and upper limit (c) versus laser average power density

3 实验条件

3.1 实验方法

在腔靶 X 光辐射场特性实验研究中,通常需要在腔壁上开一个或几个诊断孔。然后利用各种软 X 光探测设备通过诊断孔观测腔内壁的 X 光辐射。软 X 光能谱测量采用的诊断设备是软 X 光能谱仪 (SXRES),它由滤光片-X 光二极管阵列组成^[11],在低能区附加软 X 光掠入射平面反射镜分光,消除滤波法高能尾部影响。通过诊断孔观测腔内壁发射 X 光功率谱[图 3(a)],根据堵口效应修正,给出黑腔靶内 X 光辐射通量,进而计算黑腔靶内辐射场温度。

采取多针孔时空分辨成像技术研究堵口效应(多针孔的目的是使某一幅针孔像处于相机狭缝中心),即把多针孔像通过狭缝投射到软 X 光条纹相机光阴极上[图 3(b)],再进行时间扫描,最终获得诊断孔泄漏 X 光强度的时空分辨图像^[12],通过数值计算,给出诊断孔收缩率及等效面积修正因子。为测量腔靶注入口和诊断口的 X 光泄漏能量,相对泄漏口的法线方向不同夹角布置多个平响应探测器^[13,14],测量 X 光发射角分布,提供空间积分依据。在整个实验过程中,对软 X 光能谱仪各通道采取时间关联测量方法。时标信号由一个特定的快响应光

电管提供,时标信号来源于主激光分路,时标与相关电路信号的定位,通过同时观测平面靶辐射定标。

3.2 探测元件标定

近年来,在北京高能所同步辐射实验室建立起来的软 X 光标定站,为实验的定量测量提供了基准。在我们感兴趣的软 X 光能区,可获得信噪比较好的单色 X 光源,对软 X 光诊断设备的能量响应曲线进行标定。

北京同步辐射装置(BSRF)-3W1B 束线,通过掠入射柱面反射镜,截止大于 3 keV 的 X 光。再用变线距平面光栅获取 2 keV 以下单色光,得到有效光谱范围 50~1500 eV。用 1000 1/mm 透射光栅对单色光源的出射光进行分析表明,在较大的能量范围内,高次谐波和其它杂散光严重影响了光源的单色性。为了改善光源单色性和提高信噪比,需采用适当材料前置滤片消除高次谐波和其它杂散光的影响。标定使用的标准探测器为一只硅光二极管 (AXUV-100, IRD, USA)^[15]。图 2 给出典型软 X 光探测元器件碳滤光片、X 射线二极管 (Al) 和镍平面镜的能量响应标定曲线。

3.3 实验布局

实验在神光-II 基频激光装置上进行,神光-II 运行参量:激光波长 1.053 μm,激光能量 3~5 kJ/8 束,激

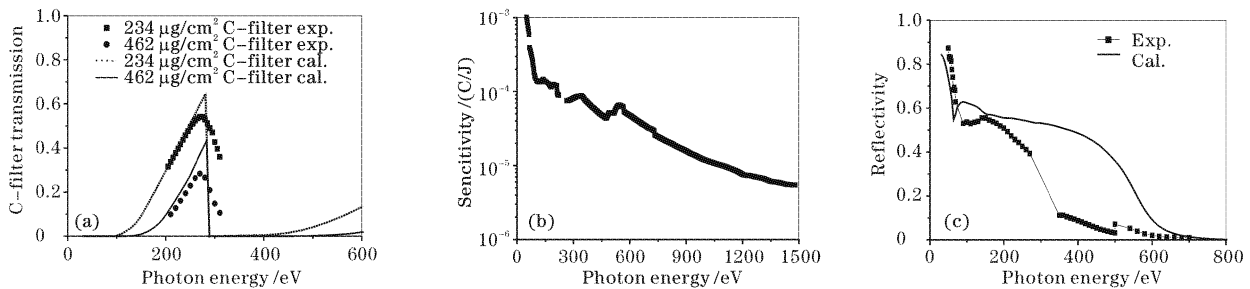


Fig. 2 The curve of photon energy response scaling. (a) C filter transmission, (b) XRD sencitivity, (c) 5° ri-mirror reflectivity

光脉冲宽度 0.6~0.9 ns, 透镜 f 数为 3; 靶室真空度 $(2\sim 5)\times 10^{-3}$ Pa。采用金柱腔靶, 南北各四路激光分别聚焦两端注入口中心, 入射角 45° 。图 3 为腔靶辐射温度测量及诊断口堵口特性研究实验装置示意图;

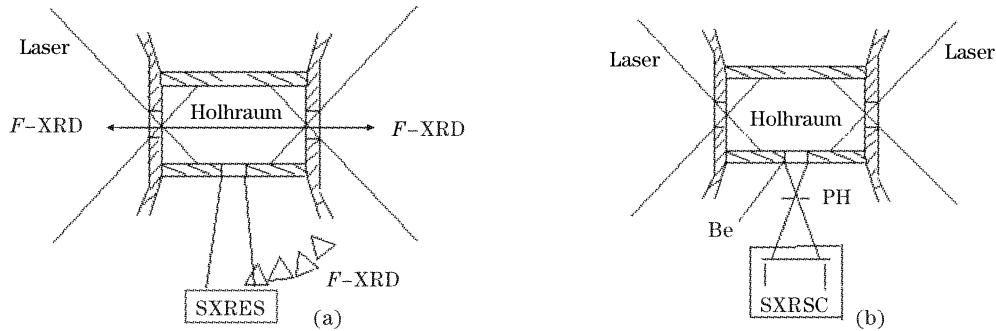


Fig. 3 The experimental scheme of cavity targets X-ray radiation diagnosis. (a) Radiation intensity measurement, (b) diagnostic hole X-ray closure measurement. SXRES: soft X-ray energy spectrometer, SXRS: soft X-ray streak camera

4 实验结果

4.1 软 X 光能谱测量

软 X 光能谱的测量信号可由下式给出:

$$Y_i = \iiint \frac{dI(E, t)}{d\Omega} H(t - \tau) R_i(E) d\tau dE d\Omega, \quad (8)$$

式中 Y_i 为测量信号, $dI(E, t)/d\Omega$ 为被测软 X 光在单位立体角内的功率谱, $H(t)$ 为测量系统的时间响应函数, $R_i(E)$ 为测量系统能量响应函数。关于这个方程, 已有相应的解谱程序。若作近似处理, 即不考虑时间过程, 能谱与空间分布无关, 能量响应函数取平均值, 则能量 E_i 处谱强度为

$$\frac{dI(E_i)}{d\Omega} = \frac{Y_i}{R(E_i) \Delta E_i \Delta \Omega}, \quad (9)$$

式中 Y_i 为谱仪第 i 道时间积分测量信号, $R(E_i)$ 为能量 E_i 处平均响应函数, $R(E_i) = S(E_i) \eta(E_i)$, S 为 X 射线二极管灵敏度, η 为滤片平均透过率。由此得到 10 个能点谱强度初值, 拟合后, 得到软 X 光能谱分布。以此为基础进行反复迭代, 直到各道在误差范围内都满足(8)式所描述的关系为止。图 4 给出一例时

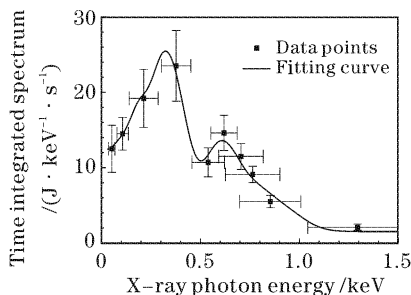


Fig. 4 The X-ray energy spectrum distribution of typical cavity target

图 3(a)表示腔靶辐射功率谱测量装置示意图, 软 X 光能谱仪位于柱腔靶正东诊断口法线方向; 图 3(b)表示诊断口堵口效应特性研究实验装置示意图, 多针孔-扫描相机位于柱腔靶正东诊断口法线方向。

间积分的软 X 光能谱解谱结果, 而时间分辨能谱分时刻计算, 各时刻的能谱分布计算与此计算步骤相同。

4.2 辐射角分布测量

图 5 为黑腔靶诊断口发射 X 光的能量角分布。通过软 X 光功率谱, 对能量和空间积分, 得到诊断口泄漏 X 光功率为

$$I(t) = \iint \frac{dI(E, t)}{d\Omega} dE d\Omega, \quad (10)$$

式中单位立体角内的功率谱 $dI(E, t)/d\Omega$ 由软 X 光能谱仪测量获得, 空间积分由平响应 X 射线二极管的角分布测量提供信息。

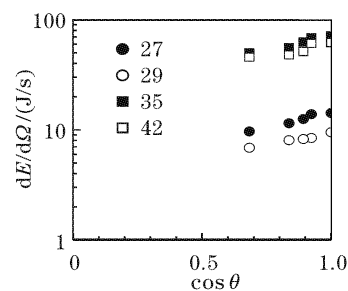


Fig. 5 X-ray energy angular distribution from diagnostic hole

4.3 堵口因子

通常 5 针孔阵列可获得诊断口不同弦高的 X 光时空图像, 根据成像几何参量可以确定其中每幅图像对应于靶点相隔 $40 \mu\text{m}$ 处的弦上 X 光分布。几何尺度最大的一幅经过诊断口中心, 显示 X 光强度沿径向分布随时间演化。首先给出不同时刻 X 光强度径向分布 $I(t, r)$, r 为诊断口半径, 假定等离子体等温径向膨胀速度为 V , 等离子体汇芯时间 $t_i =$

R/V , 在 $t < t_f$ 时, 中心强度为 $I(t, 0)$, 则 t 时刻诊断孔 X 光透过率的径向分布为

$$T(t, r) = I(t, r)/I(t, 0), \quad (11)$$

t 时刻, 整个孔的 X 光透过率为

$$\epsilon(t) = 2\pi \int_0^R T(t, r) r dr / (\pi R^2), \quad (12)$$

在 t_f 时刻前, 可以给出诊断孔 X 光透过率随时间变化的对应关系, t_f 时刻后的诊断孔 X 光透过率变化

比较复杂, 当腔内辐射温度较高, 维持时间较长, 由于诊断口等离子体震荡, X 光仍能从诊断口泄漏, 仍能做出类似的透过率变化曲线, 但此时发射 X 光强度已相对较弱, 对总的发射影响较小。从而得到一个完整的诊断孔透过率随时间变化曲线 $\epsilon(t)$ 。图 6(a) 为诊断口辐射时空分辨成像; 图 6(b) 为堵口时间扫描曲线及透过率随时间变化曲线。

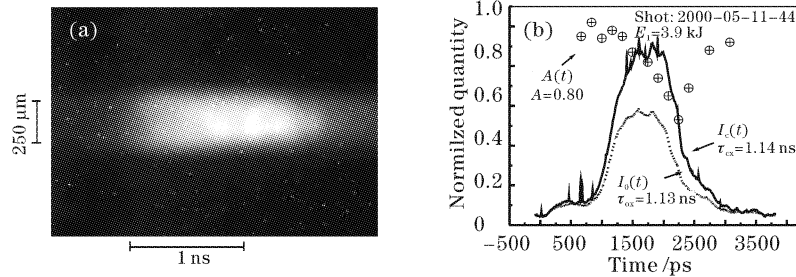


Fig. 6 (a) Temporal and spatial resolution image at diagnostic hole radiation, (b) closure time scanning curve and transmission versus time

堵口实验共做七发, 靶尺寸 $\phi 700 \mu\text{m} \times 1400 \mu\text{m}$, 诊断口直径 $\phi 260 \mu\text{m}$, 打靶条件 $3.5 \sim 4.5 \text{ kJ}/8$ 束, 七发实验诊断口时空积分透过率 $0.72 \sim 0.81$, 平均值为 0.77 。

4.4 等效辐射温度及其定标关系

利用斯提芬-玻尔兹曼定律 ($J = \sigma T_r^4$, 式中 J 为能流密度, σ 为斯提芬-玻尔兹曼常量, T_r 为等效积分温度) 求得辐射温度。对能流密度 $J(t)$ 的定义为

$$J(t) = I(t)/[\epsilon(t)A_h], \quad (13)$$

式中 $\epsilon(t)$ 为堵口修正因子, A_h 为诊断口面积。或对于平均能流密度 \bar{J} 定义为

$$\bar{J} = E_x / (\tau \bar{\epsilon} A_h), \quad (14)$$

其中 E_x 为 X 光积分能量, τ 为脉冲宽度, $\bar{\epsilon}$ 为平均堵口修正因子。

图 7(a) 给出神光 II 基频光辐照不同尺寸柱型

腔靶实验时, 腔内等效辐射温度与激光平均辐照功率密度的关系^[16]; 图 7(b) 为神光 I 基频光辐照不同类型腔靶实验时, 腔内等效辐射温度与激光平均辐照功率密度的关系^[17]; 图 7(c) 综合神光 I 和神光 II 基频光-腔靶实验数据, 并根据实验数据拟合给出的定标关系式 $T_r = 160 I_L^{0.22}$, 这里 $I_L = P_L/A_w$ 以 $10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$ 为单位, T_r 以 eV 为单位。图中还给出了温度估算的上下限, 温度上限是耦合效率 $\eta = 0.3$ 时的计算结果, 下限是耦合效率 $\eta = 0.2$ 时的计算结果, 实验数据基本都在温度估算的上下限内。由此可见, 基频光的耦合效率大约为 0.25 。

5 误差讨论

在软 X 光能区, 由于国内还没有正式的绝对计量标准, 这对我们的标定工作十分不利。目前, 只能

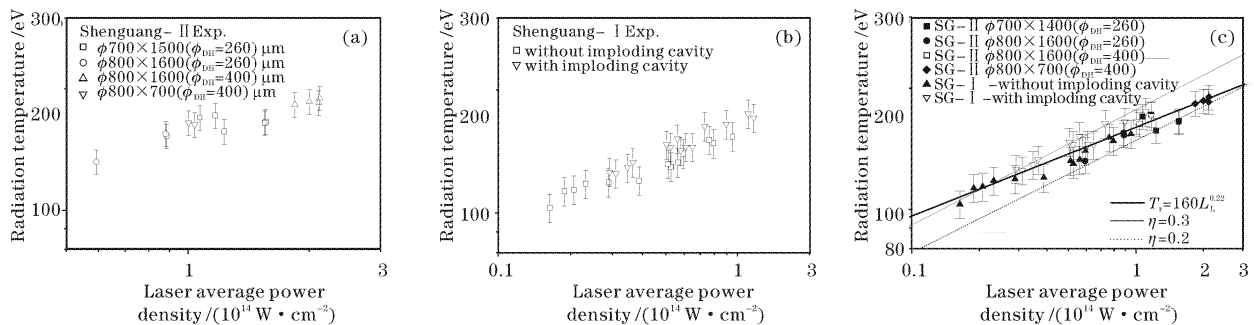


Fig. 7 The radiation temperature for laser-targets with basic-frequency versus laser average power density. (a) Shenguang II data, (b) Shenguang I data, (c) synthesised data of Shenguang I and Shenguang II

借助美国 IRD 公司生产的 AXUV-100 硅光二极管作次级标准探测器,它的能量响应曲线是由美国 NIST 的 BNC 实验室给出的,尚存在较大测量误差(约在 $\pm 10\% \sim \pm 22\%$ 之间),因此,我们的软 X 光探测元器件能量响应曲线标定误差主要受制于这种源强监测的精度。其次是光源自身的误差因素,如单色器的高次谐波、能量偏移、能量分辨、杂散光、光束发散度等,以及测量记录系统与本底等,以 X 射线衍射为例,其灵敏度标定误差约为 $\pm 12\% \sim \pm 23.5$,平均误差约为 $\pm 17\%$ 。滤光片透过率及平面镜反射率标定时,入射流与出射流采用同样测试条件和记录方法,数据处理采取相对比值,光源强度绝对监测误差可抵销,加之束流寿命长和稳定性好,相对比值对束流强度变化的修正往往小于 $\pm 1\%$,主要误差来源于相对几何位置的偏差,当我们适当控制光栏尺寸及探测器几何位置,可使滤光片透过率及平面镜反射率标定误差小于 $\pm 5\%$ 。

堵口效应是一个复杂的物理问题,在 t_f 时刻前实验可给出比较可靠的数据,而这段时间 X 光发射量已占总量的大部分。 t_f 时刻后,腔壁辐射强度变弱,诊断系统选择波段范围不合适,以及衰减片选择不合适等,都将给透过率估计带来误差,要减小这部分误差,还需要更详细的进一步实验研究。根据现有实验结果分析估算,堵口效应修正因子误差 $\leq \pm 10\%$ 。软 X 光总量测量误差为 $\pm 27.9\%$,根据斯提芬-玻尔兹曼定律,等效辐射温度误差 $\leq \pm 7\%$,参见表 1。

Table 1 Soft X-ray total measurement error

Factor	Error /%
XRD sensitivity	± 17
Angular distribution	± 15
Data processing	± 10
Closure correction	± 10
Filter transmission	± 5
Mirror reflectivity	± 5
Geometry factor	± 2
Reading system	± 2
Total error of root-mean-square	± 27.8

致谢 实验得到制靶人员和神光-II 装置运行人员的大力协作,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

1 Yu Min. Look into the Inatial Confinement Fusion. The China Academy of Engineering Physcis, CAEP-001,HL~0001,1988

- Chang Tiqang, He Xiantu, Yu Min. Physics process of the indirect-drive in inertial confinement Fusion with high gain. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1989, **1**(3):193~209 (in Chinese)
- Kauffman R L, Suter L J, Darrow C B *et al.*. High temperature in inertial confinement Fusion radiation cavities heated with 0.35 μm light. *Phy. Rev. Lett.*, 1994, **73**(17):2320~2323
- John Limdl. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement Fusion and the target physics basis for ignition and gain. TUCRL-JC-19901,L-19821-preprint 1995
- Sun Kexu K, Yi Rongqing, Jing Shao'en *et al.*. Experimental study on pinhole closure of diagnostic pinhole in the radiation heated cavity. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(11): 1651~1656 (in Chinese)
- Pakura R. Generation of intense black-body radiation in a laboratory pulsed power source. *Phys. Fluids*, 1986, **29**(2): 463~467
- Kauffman R L, Komblum H N, Philion D W *et al.*. Drive characterization of indirect drive targets on the Nova Laser. *Rev. Sci. Instrum.*, 1995, **66**(1): 678~682
- Jiang Shao'en, Zheng Zhijian, Ding Yongkun *et al.*. First experiments of pinhole transmission on Shengguang II laser Facilities. *J. Laser* (激光杂志), 2001, **22**(5): 28~30 (in Chinese)
- Zheng Zhijian, Xie Ping, Sun Kexu *et al.*. Elementary explorations for hohlraum physics. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1993, **5**(4): 575~580 (in Chinese)
- Zhang Jun, Pei Wenbing, Sui Chengzhi *et al.*. Radiation temperature and X-ray convesion efficianay for laser-cavity target. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1991, **40**(3): 424~432 (in Chinese)
- Sun Kexu, Yang Jianguo, Zheng zhijian. A subkeV X-ray spectrometer used in laser plasma interaction experiments. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1990, **2**(1): 16~22 (in Chinese)
- Yi Rongqing, Miao Wenrong, Sun Kexu *et al.*. Experiment study of radiation temperature in cavity. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1996, **45**(3): 443~448 (in Chinese)
- Kornblum H N, Slivinsky V W. Flat-response subkiloelectronvolt X-ray detector with a subnanosecond time response. *Rev. Sci. Instrum.*, 1978, **49**(8): 1204~1205
- Huang Tianxuan, Sun Kexu, Yi Rongqing *et al.*. X-ray conversion study of laser-plasmas with 0.35 μm light. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1996, **45**(10): 1688~1693(in Chinese)
- Cui Congwu, Cui Minqi, Zhu Peiping *et al.*. The measuring system for soft X-ray absolute intensity and its calibration. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1998, **22**(2): 180~185
- Sun Kexu, Huang Tianxuan, Ding Yongkuen *et al.*. The experiment research of radiation temperature for holhraums. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2002, **51**(8): 1750~1754 (in Chinese)
- Sun Kexu, Ma Honglian, Yi R *et al.*. Radiation temprature in hohlraum targets with laser intensities. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1992, **4**(3): 461~466 (in Chinese)