

辐射温度与其驱动 Al 冲击波速度的定标关系研究*

江少恩[†] 李三伟

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2008 年 7 月 26 日收到, 2008 年 9 月 1 日收到修改稿)

利用一维辐射流体力学程序, 对不同脉冲波形的辐射温度与 Al 中冲击波速度关系进行模拟计算和分析. 指出定标公式 $T_r = 0.0126D^{0.63}$ 主要适用于整形脉冲的辐射温度波形, 而对高斯型和方波脉冲激光产生的辐射温度波形则不完全适用. 通过计算给出修正的定标公式, 且与自相似解得到的结果一致. 另外对神光 III 原型装置的整形脉冲辐射温度驱动 Al 样品冲击波轨迹进行了计算, 得到第二个冲击波稳定传播所要求的 Al 样品的最小厚度. 最后利用神光 II 装置产生的辐射驱动冲击波, 由修正的定标关系得到的辐射温度与软 X 射线能谱仪测量的辐射温度十分相符, 从实验证实了修正定标关系的可靠性.

关键词: 辐射温度, 冲击波速度, 定标关系, 整形脉冲

PACC: 5250J, 5265, 5270

1. 引 言

在间接驱动的惯性约束聚变(ICF)研究中, 激光通过注入孔注入高 Z 材料(如 Au)制作的黑腔内, 在腔壁吸收并转换 X 射线, 形成较为均匀的辐射场, 辐照位于黑腔中心包含聚变燃料的靶丸, 使其内爆燃烧. 辐射温度是黑腔最为重要的物理量之一, 它是黑腔的特征物理量, 因此准确地测量黑腔内的辐射温度是一项非常重要的实验诊断工作. 通常采用软 X 射线能谱仪 Dante 测量黑腔辐射软 X 射线谱, 然后通过能谱积分获得等效辐射温度^[1]. 这种方法虽有许多优点(比如可以鉴别 X 射线谱的特性、判定黑腔中的 X 射线谱是平衡的还是非平衡的), 但是测量温度的精度受到一定的限制, 目前国际上此方法达到的辐射温度相对不确定度上限约 $\pm 5\%$ (国内约 $\pm 8\%$), 而且观测方位还影响辐射温度的大小. 辐射温度测量准确与否, 直接关系到内爆压缩、聚变点火与燃烧以及 ICF 中一系列基础物理的研究. 因此有必要寻求新的测量黑腔温度的方法, 而用辐射驱动 Al 样品产生的冲击波速度的方法测量辐射温度可以得到比较高的精度, 目前国际上此方法给出的辐射温度不确定度约 $\pm 5\%$.

这种由冲击波速度确定辐射温度的方法, 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, 冲击波首先在 Al 基底中传播, 然后进入 Al 台阶区(已知厚度差 Δd), 利用时空分辨可见光谱仪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. 在 Nova 激光装置上通过激光腔靶间接驱动冲击波实验证实, 在 2.2 ns 的整形脉冲(激光预脉冲与主脉冲的对比度为 1:3, 简称为 PS22)的激光条件下, Al 样品中辐射驱动的冲击波速度和腔内辐射温度的定标关系^[2]为

$$T_r = 0.0126D^{0.63}. \quad (1)$$

其中 T_r 和 D 单位分别为 eV 和 cm/s. 文献 [2] 直接写出这个公式, 并未推导, 而且仅指出该公式适用于 PS22 的整形脉冲产生的辐射温度测量. 对方波、高斯型以及其他整形脉冲激光产生的辐射温度是否适合, 也并未指明. 而神光 II(SG II)装置主要以方波激光脉冲为主, 也采用(1)式来计算辐射温度, 可是这样做是否合适, 需要仔细研究. 另外, 神光 III 原型(SG III YX)装置的脉冲有 1 ns 脉冲宽度的高斯型、3 ns 脉冲宽度的方波以及 3 ns 整形脉冲激光驱动的

* 国家自然科学基金(批准号: 10775120)资助的课题.

[†] E-mail: jiangshn@vip.sina.com

冲击波速度,是否可以使用(1)式来计算辐射温度;也值得商榷.如果不适用,那么在 SG III YX 下,冲击波速度与辐射温度定标关系式应该是什么样的?这正是我们需要研究的问题.

本文利用一维辐射流体力学程序,对不同脉冲波形的辐射温度与 Al 中冲击波速度关系进行模拟计算,给出(1)式适用的辐射温度波形,对不完全适用的辐射温度波形,给出修正的定标公式.另外,还对 SG III YX 装置的辐射温度与冲击波的定标关系进行了仔细的模拟分析;对 SG III YX 装置整形脉冲的驱动冲击波压缩进行了模拟,给出了第二冲击波赶上第一个冲击波的时间和最小靶的厚度.

2. 辐射温度与冲击波速度定标关系的确定方法

对于辐射温度与冲击波速度定标关系的研究,由于解析方法十分复杂,且要求将辐射不透明度(opacity)和状态方程(EOS)拟合出合适的幂指数,还要辐射温度满足一定的函数关系,才可能得到定标关系.这一方面限制了定标关系的使用范围,另一方面精度也难以保证,这是因为用辐射不透明度和 EOS 的简单拟合函数表示会带来较大的误差.因此,有必要采用数值模拟方法来研究.使用的模拟程序为 Hyades,此程序是一个一维、三温的 Lagrange 辐射流体力学模拟程序,主要用于模拟高功率激光与等离子体相互作用过程,可以用来研究激光与靶作用流体动力学物理图像,对于辐射驱动靶产生冲击波过程的研究是极为适用的^[31]. Hyades 使用的 EOS 为 Sesame 数据库,而辐射不透明度则采用多群平均原子模型,光子能量范围是 10—15000 eV,分为 35 群.

具体的研究方法如下:第一步输入给定的辐射温度时间波形.第二步由 Hyades 计算出稳定传输的冲击波速度.第三步与第一步类似,输入的辐射温度波形相同而峰值温度不同,重复第二步的过程得到另一辐射温度下的冲击波速度.于是可以得到对应于多个辐射温度下的冲击波速度.然后采用

$$T_r = \alpha D^\beta \quad (2)$$

进行拟合,求出 α 和 β ,于是得到定标关系.

3. 整形脉冲的辐射温度与 Al 冲击波速度的定标关系

(1)式的定标关系使用于 PS22 的辐射温度波

形,因而我们首先模拟了 Nova 上 PS22 的辐射温度定标关系. PS22 的激光功率 P_L 与辐射温度 T_r 波形见图 1. 由 Hyades 计算的冲击波速度与辐射温度之间的关系见图 2,图中给出了 Hyades 计算结果,实线由定标关系(1)式给出,同时还给出了 Hyades 计算的结果与所对应点的定标关系(1)式之间的差值 δT_r . 由图 2 可以看出,在辐射温度为 75—260 eV 之间 Hyades 的计算结果与定标关系(1)式符合得很好,定标关系曲线与 Hyades 计算的辐射温度定标之间的差值小于 1 eV,相对不确定度小于 1%. 这表明 Hyades 程序重现了 LASNEX 程序对于定标关系的结果,说明 Hyades 程序在计算辐射驱动冲击波过程的可靠性. PS22(激光预脉冲与主脉冲的对比度为 1:6)的辐射温度波形见图 3,与 PS22 的计算结果类

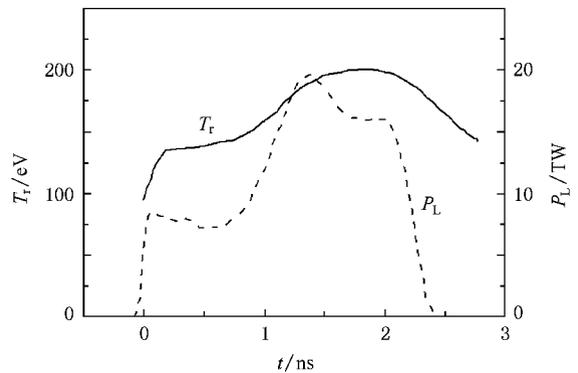


图 1 NOVA 上 PS22 整形脉冲激光与辐射温度波形

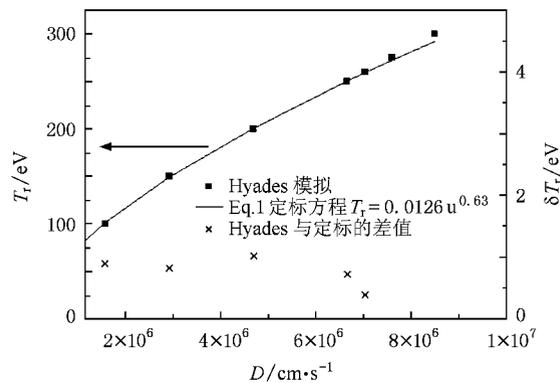


图 2 定标式(1)与 Hyades 计算结果的比较

SG III YX 装置整形脉冲的激光和辐射温度波形见图 4. 图 5 中以 SG III YX 表示原型装置,激光预脉冲与主脉冲的对比度为 1:4. 为了比较,将 PS22, PS22(对比度为 1:6)^[41]和 SG III YX 装置的整形脉冲

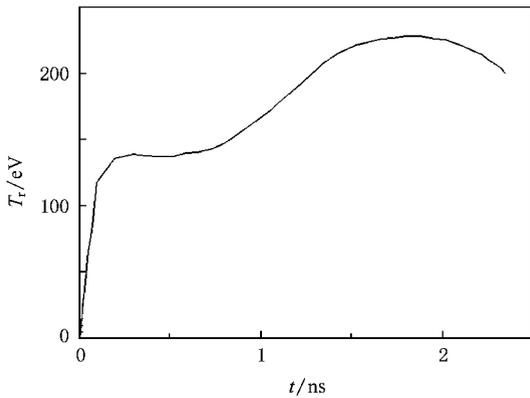


图 3 Nova 上 PS26 整形脉冲的辐射温度波形

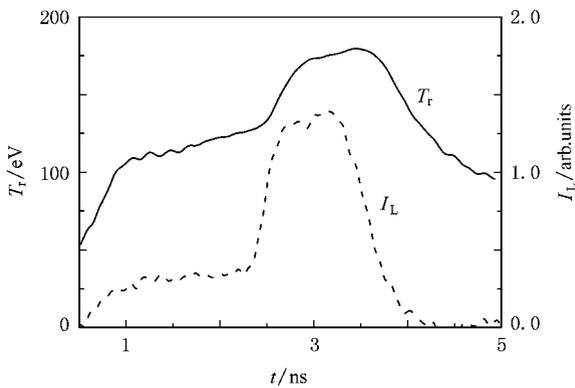


图 4 SG III YX 装置上整形脉冲激光与辐射温度波形

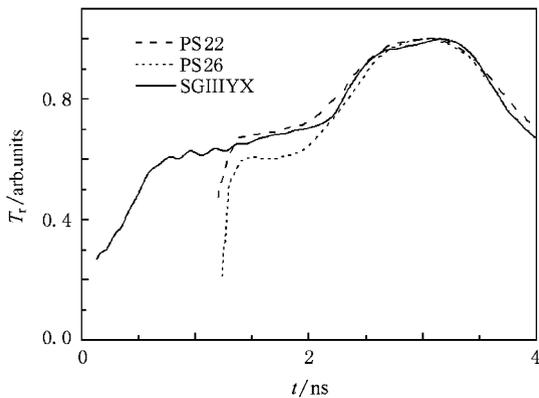


图 5 PS22, PS26 与 SG III YX 整形辐射温度波形比较

的辐射温度时间波形一并示于图 5, 辐射温度已经以峰值温度进行归一化. 由此可见 SG III YX 装置的整形脉冲 (1:4) 的辐射温度形状介于 PS22 (1:3) 与 PS26 (1:6) 之间, SG III YX 装置的辐射温度测量应当是合理的. 由于 PS22 和 PS26 满足定标关系(1)式, 那么可以期望 SG III YX 整形脉冲遵从标准的辐射温度定标关系. 由于 SG III YX 装置是我们今后一段时间激光聚变研究的一种主要激光装置, 那么有必要

对其辐射温度与冲击波速度的定标关系进行仔细的研究. 图 6 为峰值辐射温度为 200 eV 驱动 Al 样品的流线图 and 冲击波轨迹. 由图 6 可以看出, 存在双冲击波结构, 第一个冲击波是由预脉冲形成的, 当主脉冲作用期间, 形成第二个较强的冲击波追赶第一个, 在某个时刻会赶上第一个冲击波. 对于 SG III YX 整形脉冲, 在不同的峰值辐射温度 (150—230 eV) 下产生的冲击波轨迹图像见图 7, 可以看出两个冲击波轨迹均存在直线部分. 这说明两个冲击波均存在稳定传播过程, 对第二个冲击波轨迹的直线部分进行拟合可以得到冲击波速度. 由图 7 还可以看出, 随着温度的升高, 第二个冲击波速度显著增大. 由图 7 得到的冲击波速度与其对应的辐射温度可以绘出定标关系曲线, 结果与图 2 类似, 这进一步表明 SG III YX 装置的整形脉冲符合定标关系(1)式. 由图 7 还可以得到第二个冲击波稳定传播所要求的 Al 样品的最小厚度 H , 也就是图 7 中的两个冲击波轨迹的交点处. 这样得到的 Al 样品最小厚度 H 与峰值辐射温度的关系曲线见图 8, 由该曲线还可以进一步得到拟合公式为

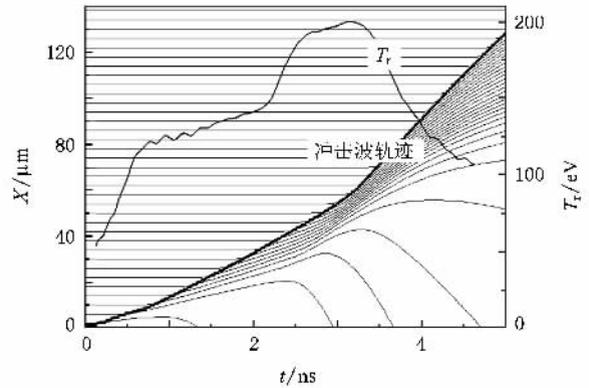


图 6 SG III YX 整形辐射温度与流线及冲击波轨迹

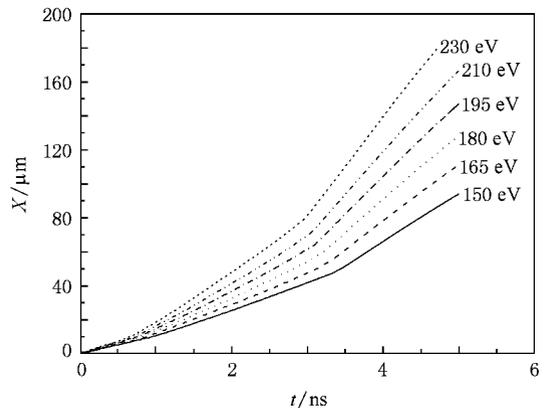


图 7 SG III YX 整形脉冲在不同温度下的冲击波轨迹

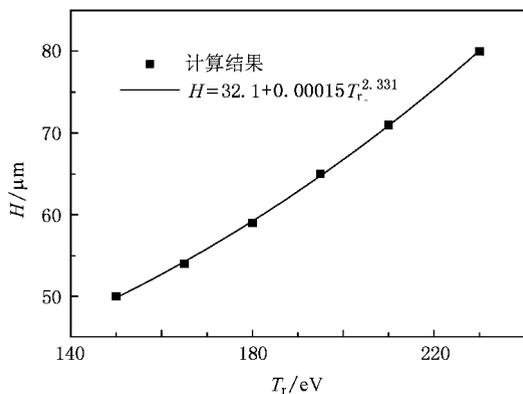


图 8 SGⅢYX 整形脉冲第二冲击波稳定传输所需 Al 样品的最小厚度

$$H = 32.1 + 0.00015 T_r^{2.331} \quad (3)$$

其中 H 单位为 μm , T_r 单位为 eV .

4. 1 ns 激光脉冲的辐射温度与 Al 冲击波速度的定标关系

由以上所述可知,定标关系(1)式适合于 SGⅢ YX 的整形脉冲,但是否适用于 1 ns 的激光脉冲呢?下面将对此给予讨论.

SGⅢ YX 装置 1 ns 激光脉冲波形见图 9,图中还给出了高斯函数拟合的波形以及用梯形逼近的波形.从图 9 可以看出,SGⅢ YX 1 ns 激光波形介于高斯形和梯形之间,更接近于梯形.因此 SGⅢ YX 的 1 ns 脉冲激光产生的辐射温度时间波形与 SGⅡ, Nova, Omega 的方波^[5](也可以称为梯形,因为不存在真正的方波脉冲)激光驱动的辐射温度波形应该接近.对应的辐射温度时间波形如图 10 所示.从图 10 可以看出,方波脉冲产生的辐射温度波形共由三段组成.在激光上升阶段,辐射温度随激光功率增大而增大;当激光功率达到平顶阶段,辐射温度缓慢增大,一般可以用 $T_0 t^{0.15}$ 形式表示^[6];当激光功率下降后,辐射温度也开始下降.为了更清楚起见,将激光功率 P_L 与辐射功率 P_{rad} 时间波形一起示于图 11,由此可以清楚地看出辐射温度的三个变化阶段.由图 10 可以知道,SGⅡ, Nova, Omega 的方波激光驱动的辐射温度波形在第二个阶段几乎重合,只是第一个阶段和第三个阶段有差别,这是由于激光前后沿的宽度有所差别造成的.而 SGⅢ YX 装置的 1 ns 脉冲不完全是梯形,所以与另三个方波激光驱动的辐射温度波形的第二个阶段略有差别,但差别不大.

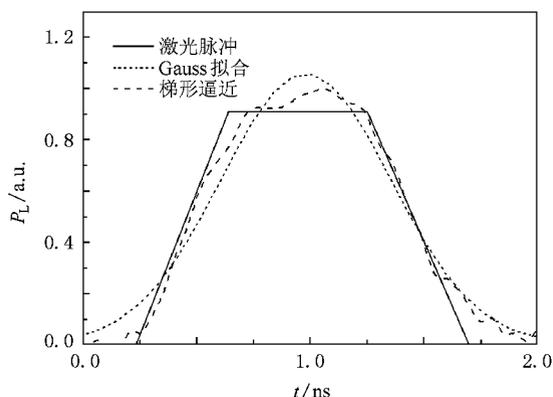


图 9 SGⅢ YX 1 ns 脉冲宽度激光时间波形、用高斯函数拟合波形以及梯形逼近波形

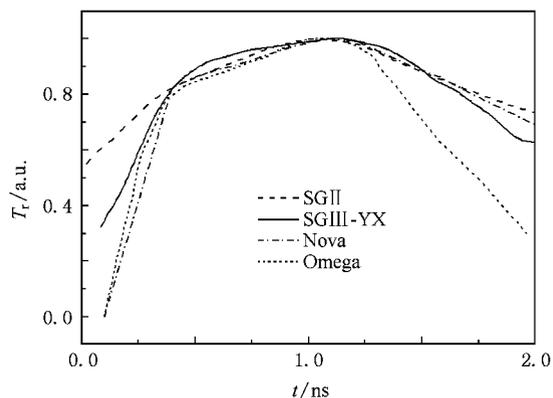


图 10 SGⅢ YX 1 ns 激光、SGⅡ、Nova 及 Omega 的 1 ns 方波激光驱动辐射温度波形

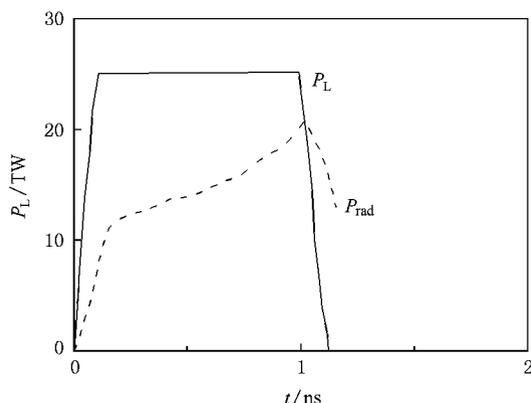


图 11 Nova 方波激光脉冲及其辐射波形

以 Omega 的 1 ns 脉冲方波激光为例,对峰值辐射温度为 200 eV 的辐射场驱动 Al 样品的冲击波进行计算,得到 Al 样品的流线和冲击波轨迹见图 12,可以看到辐射温度曲线仅形成单冲击波.与上述

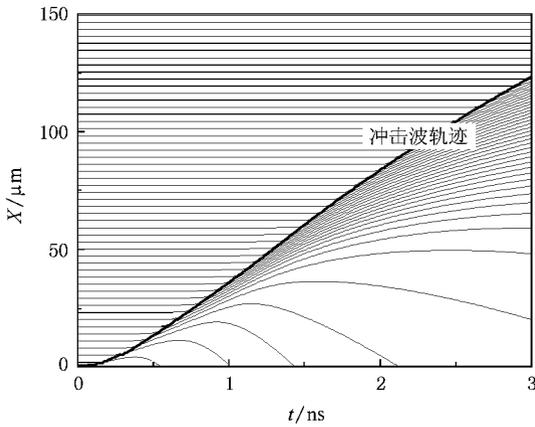


图 12 Omega 的 1 ns 脉冲驱动的流线及冲击波轨迹

类似, 计算多个辐射温度点下的冲击波速度, 得到 1 ns 方波脉冲的辐射温度与冲击波速度关系曲线见图 13, 图中的虚线为(1)式得到的结果, 数据点为计算结果, 比较各点与定标关系所对应的辐射温度值得到差值 δT_r , 可以看出在 4—10 eV 之间. 由此可知(1)式的定标关系不太适合 1 ns 高斯脉冲的辐射温度定标. 将 Hyades 的计算结果拟合形成一条实线, 得到的关系式为

$$T_r = 0.00953 D^{0.645}. \quad (4)$$

其中 T_r 与 D 的单位分别为 eV 与 cm/s. (4) 式就是 1 ns 方波脉冲激光的辐射温度与冲击波速度的定标关系公式, 适用于 Nova, Omega 和 SG II 装置的方波激光下的辐射温度与冲击波速度定标. 实际上, 对于 SG II 装置的 1 ns 高斯脉冲激光驱动的冲击波, 文献 [7] 采用自相似解导出的定标关系为

$$T_r \propto D^{0.65}. \quad (5)$$

T_r 与 D 的单位分别为 eV 和 cm/s. 此定标关系(5)式

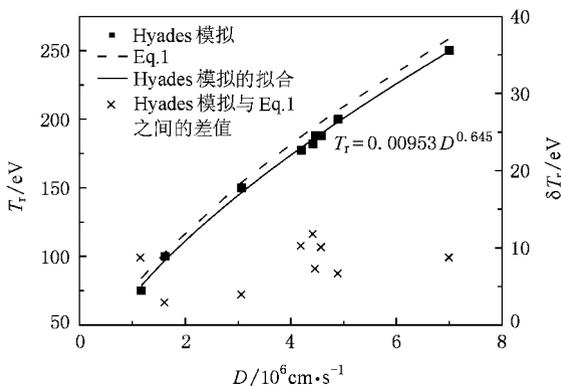


图 13 Omega 的 1 ns 方波驱动辐射温度与冲击波速度定标关系曲线

与采用数值计算的定标关系(4)式十分接近, 两者的幂指数之间的差异仅为 $(0.65 - 0.645)/0.65 = 0.7\%$. 而自相似解的推导具有内在的物理含义, 可见自相似解的结果印证了数值模拟结果, 从另一方面也说明了定标关系(4)式的可靠性.

由于 SG III YX 装置的 1 ns 脉冲激光与 1 ns 方波激光波形很接近, 且辐射温度波形也与方波激光的辐射温度波形相近, 可以推想(4)式也适用于 SG III YX 装置的 1 ns 脉冲激光驱动的辐射温度与冲击波速度定标关系. 故而对 SG III YX 的 1 ns 脉冲的定标不再重复计算.

5. SG II 激光装置上的辐射驱动冲击波实验

为了从实验检验定标关系(4)式, 可以采用 SG II 激光装置上的辐射驱动冲击波实验来说明. 激光条件为八束激光分别相对柱腔轴线成 45° 角从腔靶注入入口进入腔内, 三倍频激光能量约为 8×260 J, 波形为 1 ns 的方波, 激光离焦量为 0.4 mm (焦后). 采用的靶型见图 14, 用 $\phi 0.8$ mm \times 1.7 mm 的柱腔作为高温 X 射线辐射源. 这种腔在过去几年辐射输运实验中进行过仔细研究^[8], 辐射源特性比较清楚, 腔长比 SG II 标准柱腔 ($\phi 0.8$ mm \times 1.4 mm) 要长, 其目的是为了降低激光第一打击点产生的高能 X 射线对样品的辐照, 降低预热效应, 同时腔长增大也改善了辐射波在样品中产生冲击波的平面性. 壁厚度为 35 μ m, 两端激光注入孔直径为 0.42 mm, 在柱腔壁上中间位置开矩形诊断孔 0.46 mm \times 0.4 mm, 孔上贴冲击波样品. 冲击波样品为 Al 台阶, 28 μ m, 43 μ m; 阻抗匹配样品为 Al 台阶, 28 μ m, 聚苯乙烯 (PS) 方块, 28 μ m. 由于聚苯乙烯材料相对冲击波发光信号透明, 因此在聚苯乙烯方块五个外表面上镀 Al 层 0.25 μ m, 其目的是阻止直穿可见光信号进入条纹相机成像系统. 为了避免杂散光 (主要是二倍频光 526 nm 和三倍频光 351 nm) 照射到冲击波样品上进入光学条纹相机的视场范围进而给测量带来干扰, 在样品周围加装了一个锥形屏蔽筒, 屏蔽筒长 10 mm, 锥角 30° , 实验用靶照片见图 15. 在冲击波样品背面正方向放置一台时空分辨可见光谱仪 (SOP), 从腔壁诊断口测量台阶 Al 样品和阻抗匹配样品背侧可见光 (波长为 400 nm \pm 100 nm) 信号的时空分辨图像, 从而给出冲击波传播速率, 由冲击波速率确定黑腔内

等效辐射温度.在可见光条纹相机前成像系统光路上使用了专门设计的 352—525 nm 组合带通滤片,再配上 351 和 526 nm 全反镜,测量冲击波实验前换上新的防溅射板,从而提高了信噪比.在腔靶轴向成 30°角的方位上放置一台软 X 射线能谱仪,监测腔内时间分辨 X 射线谱和腔内辐射温度.

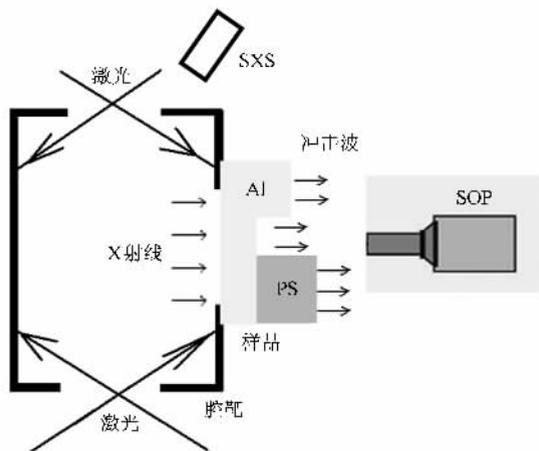


图 14 实验用靶结构示意图



图 15 实验用靶照片

图 16 给出了典型实验发次(20061021013 发)获得的冲击波发光图像,图像上部对应 Al 台阶,中间对应 Al 基片,下面为聚苯乙烯台阶,图像横向为时间扫描方向,纵向为空间分辨方向.从图 17 可以看出以下三个方面的信息.第一,在空间方向上图像两端边缘冲击波出现弯曲,这是由于腔内 X 射线烧蚀长方形诊断孔边缘产生的 Au 等离子体聚心效应(堵口效应)照在样品边缘上的等效辐射流强度减弱导致冲击波速度变慢,从而形成冲击波图像弯曲.第二,冲击波在 Al 基片背侧卸载后产生的侧向稀疏

波随时间逐步向厚样品扩散,即 Al 基片等离子体横向膨胀(台阶样品背侧冲击波发光之后).图 17 给出了 20061021012 和 20061023013 两发次的软 X 射线能谱仪激光注入孔测得的腔内时间分辨辐射温度 T_{r-SXS} .表 1 中同时列出了两发次软 X 射线能谱仪测得的峰值辐射温度 T_{r-SXS} 和由冲击波速度推得的等效辐射温度 $T_{r-Shock}$.表 1 中第二栏为由 SOP 测量的冲击波速度 D ,第三栏为软 X 射线能谱仪测量的辐射温度 T_{r-SXS} ,第四栏为由冲击波速度 D 用定标关系(4)得到的辐射温度 $T_{r-Shock}$,第五栏为两种测量方式给出的温度差异度 $\Delta T_r/T_r$,

$$\Delta T_r/T_r = |T_{r-SXS} - T_{r-Shock}| / T_{r-SXS} \quad (6)$$

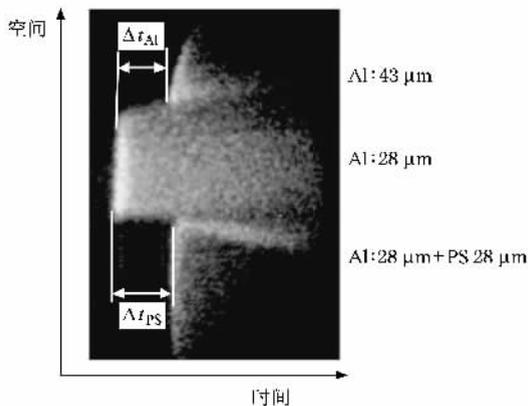


图 16 冲击波发光典型图像

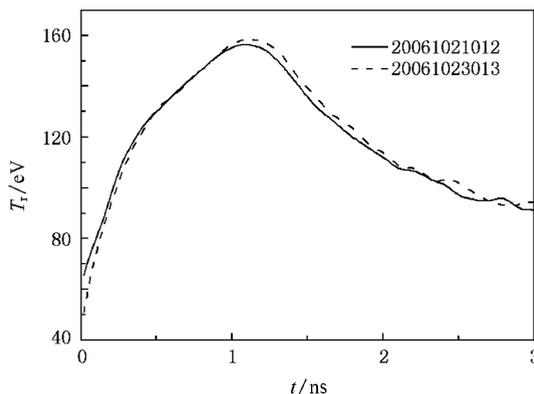


图 17 腔内时间分辨辐射温度 T_{r-SXS} 曲线

由表 1 可以看出,由定标关系(4)式给出的辐射温度与传统方式测量得到的辐射温度十分接近,差异度小于 0.5%.为了比较,在表 1 最后一栏给出由定标关系(1)式计算的辐射温度,可以看到(1)式给出的温度与软 X 射线能谱仪给出的相差较大,由

(1) 式计算的两发差异度分别为 5.0% 和 4.9% , 远远大于(4) 式给出的差异度. 因此, 定标关系(4) 式更适用于采用冲击波速度方法测量 1 ns 激光脉冲的辐射温度. 这从实验上证实了(4) 式定标关系的可靠性.

表 1 Al 样品中冲击波速度 D 以及腔内辐射温度 T_r

发次	$D(\text{Al}) / 10^6 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	$T_{r\text{-SXS}} / \text{eV}$	$T_{r\text{-shock}} / \text{eV}$	$\Delta T_r / T_r / \%$	$T_{r\text{-shock}}(1) \text{ 式} / \text{eV}$
20061021012	3.40	156.3	155.6	0.45	164.1
20061023013	3.46	158.2	157.6	0.38	166.0

6. 结 论

辐射温度与 Al 冲击波速度定标关系(1) 式主要适用于 Nova 上的 PS22 和 PS26 以及 SG III YX 的整形脉冲, 适用的辐射温度区间为 75—260 eV. 这在通常的 ICF 的研究范围内. 对梯形或方波激光脉冲(1) 式不完全适用, 有 4—10 eV 的差异, 则需要用经本文修正的定标关系(4) 式, 适用的辐射温度区间为 75—250 eV.

- [1] Jiang S E, Sun K X, Ding Y K, Huang T X, Cui Y L, Chen J S 2005 *Chin. Phys. Lett.* **22** 2328
- [2] Kauffman R, Suter L, Darrow C, Kilkenny J, Kornblum H, Montgomery D, Phillion D, Rosen M, Theissen R, Wallace R, Ze F 1994 *Phys. Rev. Lett.* **73** 2320
- [3] Larsen J, Lane S 1994 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* **51** 179
- [4] Suter L, Kauffman R, Darrow C, Hauer A, Kornblum H, Landen O, Orzechowski T, Phillion D, Porter J, Powers L, Reichard A, Rosen M, Theissen R, Wallace R 1996 *Phys. Plasma.* **3** 2057
- [5] Decker C, Turner R, Larden O, Amendt P, Kornblum H, Hammel A, Murphy T, Wallace J, Delamater N, Gobby P, Hauer A, Magelssen G, Oertel J, Knauer J, Marshall F, Bradley D, Seka W, Soures J 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 1491
- [6] Lindl J, Amendt P, Berger R, Glendinning S, Glenzer S, Haan S, Kauffman R, Larden O, Suter L 2004 *Phys. Plasma.* **11** 339
- [7] Jiang S E, Li W H, Jiang X H, Liu Y G, Cui Y L, Chen J S, Ding Y K, Zheng Z J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 94 (in Chinese) [江少恩、李文洪、蒋小华、刘永刚、崔延莉、陈久森、丁永坤、郑志坚 2000 物理学报 **49** 94]
- [8] Jiang S E, Xu Y, Ding Y K, Lai D X, Zheng Z J, Sun K X, Huang Y X, Hu X, Zhang W H, Yi R Q, Cui Y L 2005 *Sci. China G* **48** 549

Investigation of scaling laws for radiation temperature with shock wave velocity in Al^{*}

Jiang Shao-En[†] Li San-Wei

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

(Received 26 July 2008 ; revised manuscript received 1 September 2008)

Abstract

The scaling laws of the radiation temperature with shock wave velocity in Al were simulated and investigated with one-dimensional radiation hydrodynamic program Hyades. The simulation results indicated that the formula $T_r = 0.0126D^{0.63}$ could be valid for the radiation temperature generated by the shaped pulse of lasers such as PS22 and PS26 profile on Nova facilities and Shengguang III Prototype (SG III Prot), but was not suited for the radiation temperature by laser pulse with the Gaussian and trapezoid profiles, for which the scaling should be given by the modified formula, which well agrees with similarity solution. Additionally, the minimum thickness sustaining stable shock wave velocity driven by the radiation temperature with the shaped profile on SG III Prot was also obtained by using the Hyades code. Finally, The experiments of shock wave driven radiation were made on Shengguang II laser facilities. The radiation temperature T_r calculated from the modified scaling relation well agreed with the T_r measured by the soft X-ray spectrometer. The experimental results also showed the reliability of the modified formula.

Keywords : radiation temperature , shock wave velocity , scaling law , shaped pulse

PACC : 5250J , 5265 , 5270

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10775120).

† E-mail : jiangshn@vip.sina.com