

激光 X 光背光照相技术及应用

邹 杰, 张思群, 黄显宾, 张朝辉, 杨礼兵

(中国工程物理研究院 流体物理研究所 108 室, 四川绵阳 621900)

摘 要: 基于 Z 箍缩内爆物理实验诊断技术的需求, 介绍了激光 X 光背光照相的原理、圣地亚实验室的研究状况和主要结果。根据 PTS 装置物理实验结果预估, 提出了“星光”装置用于 PTS 物理实验诊断的相关要求, 同时对 Z-Beamlet 激光装置的其它用途也进行了阐述。

关键词: Z 箍缩内爆; 等离子体; X 光背光

1 引 言

X 光背光照相就是利用激光辐照金属靶片(或 X 箍缩内爆等其它方式)产生的特征硬 X 光作为点源, 对目标(靶)进行辐射照相的一种诊断技术。由于背光源的特殊性能, X 光背光照相技术常用于高温稠密等离子体、惯性约束聚变中小球内爆过程的诊断, 得到的实验结果比较满意。尽管整个系统运行复杂, 但在圣地亚实验室 Z 装置上进行的 25% 的实验都使用了此诊断手段。

在 Z 箍缩内爆实验中产生的大量不同谱段的 X 光辐射对诊断系统属于不利的背景辐射, 可能会模糊甚至掩盖所需的真实图像。因此在背光诊断中, 诊断 X 光源常采用金属材料的特征辐射线(如类 He $1s^2-1s2p$, 如表 1) 及利用合理的诊断原理, 才能获得清晰的物理图像。

2 圣地亚实验室的激光 X 光背光照相技术

圣地亚实验室的激光 X 光背光照相技术主要用于 Z 装置上的 Z 箍缩内爆实验和小球内爆实验。Z 装置是一台 36 路的脉冲功率装置, 可以给金属丝阵负载提供 20 MA、100 ns 上升沿的脉冲电流, 通过内爆能够产生 1~2 MJ, 大于 200 TW 的脉冲 X 光辐射。强 X 光辐射场可用于辐射效应、辐射输运和磁流体动力学实验, 以及间接驱动的惯性约束聚变实验。

2.1 激光 X 光背光诊断原理

图 1 是最基本的一种诊断布局结构, 但在 Z 箍缩内爆实验的复杂 X 光辐射背景下, 采用多层滤片和通量限制方法还难以取得非常令人满意的结果。在总结多次实验的基础上, 圣地亚实验室采用了球形弯晶^[1]作为衍射器件, 诊断原理主要考虑布拉格反射条件和球形光学, 再利用罗兰圆结构, 获得了清晰的目标图像。布拉格条件表明, 只有满足 $n\lambda = 2ds\sin\theta$ 的特征 X 光才能够被晶体反射, 这里 λ 为 X 光波长, d 为晶体中点阵平面的垂直间隔, θ 为掠射角(相对于晶面), n 为晶体的反射级(整数)。罗兰圆半径为 $R/2$ (R 是

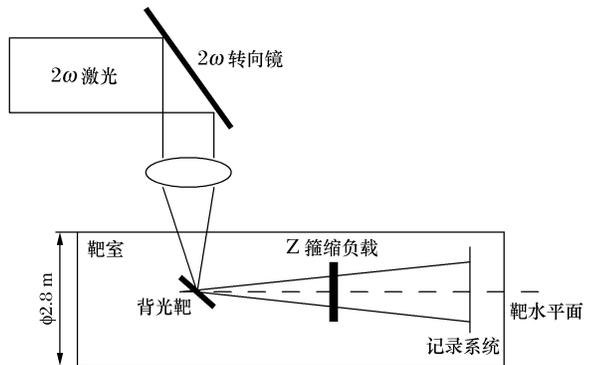


图 1 激光 X 光背光照相示意图

球形晶体的弯曲半径)。从球形光学的原理可知,在罗兰圆上的点光源通过晶体反射后又能聚焦到圆上,根据晶体的布拉格反射属性,圆环上的每一点(空间)与光子能量一一对应。假如一个物体(目标靶)放置在沿 X 光的路径上,且距晶体距离为 p ,那么 p 满足

$$R_m \sin\theta > p > (R_m/2) \sin\theta \quad (1)$$

这里 R_m 为晶体的子午线。探测器放在光路的聚焦点位置上(经晶体反射后,距晶体距离为 q),可得到物体的单色像。系统的光谱带宽由罗兰圆上的 X 光源尺寸决定,一般小于 0.5 eV 。因为探测器放在光路的焦点位置,系统有很好的空间分辨率,因此,在实验中就能做到非常理想的点-点聚焦。

该成像系统的放大倍数可估计为

$$M = p/q \quad (2)$$

从球形透镜光学能够推导出

$$p = (R \sin\theta)(M + 1)/2M \quad (3)$$

对给定的晶体和放大倍数,由(3)式给出目标的位置。如果 X 光源不在罗兰圆上,而在罗兰圆内部移动,那么光谱带宽和收集立体角将增加,系统就更有效。缺点是减少了视场并潜在地降低空间分辨率。

2.2 研究结果

背光照相系统中的激光源是 Z-Beamlet 激光装置^[2](ZBL)。在背光照相实验中,ZBL 的主要参数为: 2ω 激光 ($\lambda = 527 \text{ nm}$) 能量为 500 J (单脉冲),脉宽为 600 ps ; $34 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$ 的方形透镜焦距为 2 m ;打靶焦斑直径为 $150 \sim 200 \mu\text{m}$,辐照功率密度为 $(3 \sim 5) \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$,打靶后可产生 $4 \sim 10 \text{ keV}$ 的特征 X 光(能量约 40 mJ ,谱带宽小于 0.5 eV),诊断视场达 $4 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,系统空间分辨达 $10 \mu\text{m}$ 。



图 2 激光背光照相诊断布局照片(Z 装置靶室内)

将激光靶片置于真空靶室内,采用厚度为 $8 \sim 20 \mu\text{m}$ (因材料不同而不同)平面纯金属薄膜。在空间布局上,激光束垂直水平面,靶片与水平面成 30° 。表 1 给出了 12 种材料的实验结果^[3],包括入射激光能量、焦斑大小、激光辐照功率密度、特征 X 光对应的类 He $1s^2-1s2p$ 能点。

表 1 2ω 激光打靶实验结果

靶材	激光能量 / J	焦斑直径 / μm	激光辐射通量 / (10^{15} W/cm^2)	X 射线能量 / keV
Ge	632	165.1	4.86	10.2
Zn	672	149.2	6.33	8.9
Cu	396	174.4	2.73	8.3
Ni	621	202.4	3.18	7.8
Co	820	215.2	3.72	7.2
Fe	524	195.1	2.89	6.7
Mn	538	193.1	3.03	6.15
Cr	698	183.7	4.34	5.65
V	772	208.3	3.73	5.2
Ti	569	203.6	2.88	4.7
Sc	565	198.9	3.00	4.3
Si				1.865

为了满足一次实验多幅照相的目的,ZBL 还有另外一种工作模式^[4]。在 20 ns 时间内,产生约

2 kJ (2ω) 的激光脉冲, 诊断中将它分成 4 个脉冲(总的出光时间 < 2 ns, 每个脉冲的持续时间在 0.2 ~ 0.5 ns 之间可调), 同时利用合理的激光靶结构和记录方式, 获取相关实验结果。

由于背光照相的独特优势, 圣地亚实验室在 Z 装置上采用的布局如图 2 所示, 获取的实验结果如图 3、图 4 所示。

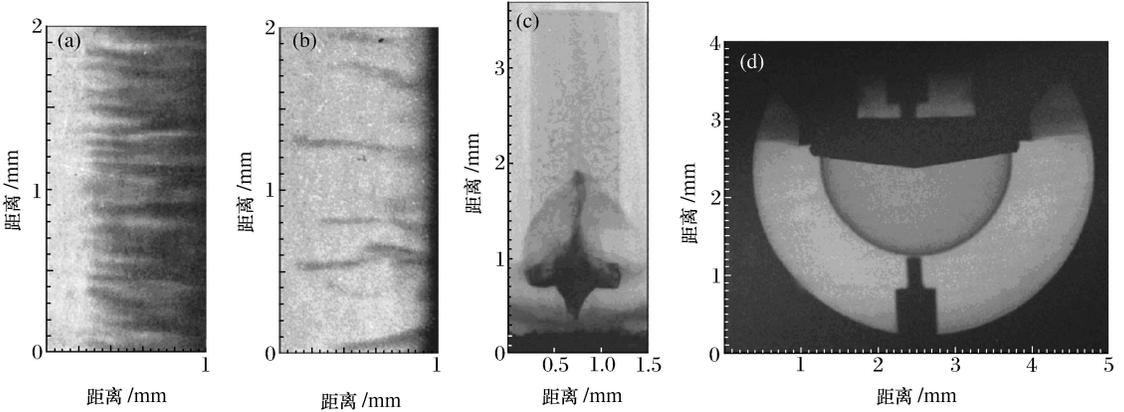


图 3 激光背光照相实验结果

- (a) 丝阵内爆早期等离子体的膨胀(1.865 keV); (b) 丝阵内爆中等离子体的滞留(1.865 keV);
(c) 金属射流在泡沫柱中的传播(6.151 keV); (d) 小球内爆运动开始时的图像(6.151 keV)

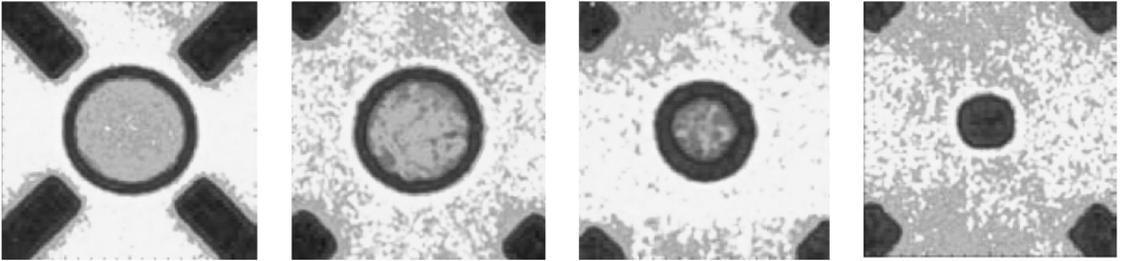


图 4 小球内爆过程(6.7 keV, 压缩比 13)

3 ZBL 的主要用途

ZBL 主要应用在以下几个方面:

(1) 具备高空间分辨率($5 \sim 10 \mu\text{m}$) 的单色 X 光背光照相技术对确定 ZPDH 和 DH 黑腔中小球内爆的极对称性非常重要。由实验获得的多幅高分辨率图像还可研究黑腔辐射驱动中的 RT 不稳定性问题。在快点火中, 要排除强韧致辐射背景的影响, 单色背光照相也是主要的诊断技术之一。

(2) 高空间分辨的背光照相常用来研究辐射输运中特殊结构产生的等离子体动力学问题, 也可用于研究一般条件下辐射产生的不稳定性问题。

(3) 可用于 X 光光电离实验中箔膨胀过程的诊断。

(4) 与分光仪和连续脉冲校准点源配套使用, 背光源可作为小球内爆和不透明测量的点投影光谱学光源。

(5) 可作为双层布拉格反射和劳厄 X 光衍射测量的 X 射线源, 测量高压作用下(ICE 技术) 多晶和其它材料中的弹性和塑性应变参数。

(6) 可作为横向测量高压下液体气样品冲击波和粒子速度的 X 射线源。该实验结构中的压力由磁场驱动铝飞片撞击液态气样品产生。同时还可用于此类实验中的飞片撞靶时的平面性测量。

(7) 可作为研究大尺度目标(直径超过 1 mm) 吸收光谱学和不透明性的光源。

(8) 在 Z 箍缩驱动的惯性约束聚变快点火中的应用。

惯性约束聚变快点火途径是把压缩与点火过程分开。包括以下 3 个物理过程: (1) D-T 燃料靶丸压缩。利用短波长中等强度的激光或脉冲功率产生 X 光驱动靶丸压缩, 使其达到尽可能高的压缩比, 最后形成 $300\sim 600\text{ g/cm}^3$ 的高密度 D-T 燃料; (2) 超短、超强激光穿孔或预置金锥通道。由于上述第一步压缩好的燃料外层包围着密度较高的推进层, 要把点火能量有效地交给核燃料, 必须先穿孔。点火激光通过此孔传到燃料附近, 产生超热电子或高能质子, 并把能量交给核燃料实现点火; (3) 超强、超短激光点火。通过穿孔激光形成通道或预设金锥通道, 点火激光由此射入 D-T 燃料附近, 在此产生近光速运动(兆电子伏量级)的高能电子或高能质子。这些电子穿过压缩气体形成约 $50\text{ }\mu\text{m}$ 直径的热斑, 使温度很快升到 10 keV , 在一个 α 粒子射程范围内沉积能量约 10 kJ , 使其点火并燃烧。

在 Z 装置上进行的一系列实验中, Z 箍缩驱动次级黑腔使用的金属丝阵 Z 箍缩源被应用到间接驱动小囊内爆与快点火燃料加热的研究中。采用 X 射线驱动安装在一个平面上的半球形小囊产生内爆, 利用黑腔的几何结构控制小囊内爆的对称性并采用高空间分辨的、晶体成像的背光系统来测量优化系统中小囊内爆的对称性。而且基于 Z 装置上低温 D_2 EOS 的测量结果, 目前已经研制出采用薄内壳层容纳 D_2 层的一个低温 D_2 小囊。利用 ZR 装置的驱动条件, 对初始燃料密度为 $0.8\sim 1.1\text{ g/cm}^2$ 的半球形靶, 在辐射对称性控制较好的情形下, 可使其密度达到 135 g/cm^3 。

在快点火中, ZBL 激光器将用于高能电子和离子束的产生、高密度和温度条件下束-物质的耦合机理研究、聚变加热和亚点火聚变中子产额的诊断。

4 PTS 装置上 Z 箍缩内爆实验中激光背光照相的设想

PTS 装置是由 24 路组成、输出电流幅度达 10 MA 、脉冲上升沿约 90 ns 的脉冲功率装置。在金属丝阵 Z 箍缩内爆实验中, 可产生数十太瓦、数百千焦的 X 光辐射, 等离子体黑体温度约 150 eV 。在激光背光照相技术研究中, 主要是想对已有的“星光”激光装置进行适当改造使之满足 Z 箍缩实验要求。

对激光装置技术指标的基本要求: (1) 二倍频能量 $> 150\text{ J}$ (聚焦在靶上能量), 能量重复稳定性大于 90% ; (2) 脉宽约 1 ns (FWHM); (3) 焦斑直径约 $75\text{ }\mu\text{m}$ (聚焦在靶上的焦斑直径); (4) 激光打靶功率密度 $> 2\times 10^{15}\text{ W/cm}^2$; (5) 从 PTS 装置给出触发信号到激光器出光的时间抖动在 $\pm 0.5\text{ ns}$; (6) 实验频率 1 发/2 天。

5 结束语

圣地亚实验室用激光 X 光背光照相技术在 Z 箍缩内爆实验和小球内爆实验上取得了一系列清晰的实验图像, ZBL 可以作为点投影光谱学光源、X 射线源, 也可以用来研究等离子体动力学和辐射产生的不稳定性问题, 并且可以应用于 Z 箍缩途径驱动的惯性约束聚变快点火中。PTS 装置的驱动能力明显低于 Z 装置, 可开展黑腔物理的初步工作。

参考文献:

- [1] Sinars D B, Bennett G R, et al. Monochromatic X-ray Imaging Experiments on the Sandia National Laboratories Z facility. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(10): 3672- 3677.
- [2] Jeffrey P Q, Joseph D K, et al. Advanced Conceptual Design Report for the Z Beamlet Laser Backlighter System. UCRL- ID- 134409.
- [3] Ruggles L E, Bennett G R, Smith I C, et al. Measurements of 4~ 10 keV X-ray Production with the Z Beamlet Laser. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(3): 2206- 2210.
- [4] Bennett G R, Landen O L, et al. X-ray Imaging Techniques on Z using the Z Beamlet laser. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 657- 662.