基于神光Ⅲ装置的光学诊断系统介绍

王峰^{*}, 关赞洋, 理玉龙, 彭晓世, 徐涛, 魏惠月, 刘祥明, 查为懿, 刘永刚, 梅雨

中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900

^{*}联系人, E-mail: xiaozei7566@163.com

收稿日期: 2018-01-17; 接受日期: 2018-03-15; 网络出版日期: 2018-05-08

摘要 光学诊断系统在惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)研究中具有重要的作用, 可以较为直观地诊断聚变过程中的一些关键物理量和参数. 本文介绍了神光Ⅲ原型和主机装置上配备的比较典型的三种光学诊断系统, 包括成像型任意反射面速度干涉仪(VISAR)、惯性约束聚变反应速率测量系统以及背向散射光测量系统. VISAR可用于测量自由面速度和透明介质中的冲击波速度, 是冲击波调速、材料压缩特性以及辐射测温研究的重要诊断技术; 惯性约束聚变反应速率测量系统用于测量聚变反应的时间演化过程, 是研究内爆动力学、理解混合效应的关键诊断技术; 背向散射测量系统用于测量激光等离子体相互作用引起的背向散射光份额, 为惯性约束物理实验激光能量与靶耦合效率参数提供了重要的数据支撑.

关键词 任意反射面速度干涉仪, 聚变反应速率, 背向散射诊断系统

PACS: 52.50.Lp, 62.50+p, 78.47.je, 52.70.Kz

1 引言

任意反射面速度干涉仪(Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR), 意为可测量任意反射表面的速度干涉仪. 其主要优点是既可以测量镜反射表面样品, 也可以测量漫反射表面样品. 在惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)研究领域, 需要对打靶激光进行脉冲整形以降低冲击压缩时的熵增从而使压缩过程接近等熵过程, 目的是为了使用最小的能量实现燃料的高压缩. 脉冲整形需要根据冲击波速度、冲击波汇聚时间等参数来进行表征. 冲击波测量具有小尺度、超高压、超高速、持续时间短、时间

分辨高的特点. VISAR凭借其上述特点, 已经成为诊断冲击波作用下样品自由面速度剖面或离子速度剖面的主要技术^[1,2]. 神光Ⅲ原型和主机激光装置在传统的VISAR系统上进行改进, 利用条纹相机和电荷耦合图像传感器(Charge Couple Device, CCD)将收光系统改为成像系统, 研制成为成像型VISAR系统, 将目标靶面成像于条纹相机的狭缝上, 使得系统具有空间分辨能力, 有利于分析冲击波在靶中各个空间不同位置的作用情况^[2].

惯性约束聚变实验中, 激光或者X光辐射加热靶丸表面, 靶丸表面的材料向外高速飞散, 驱动靶丸内壳层向中心收缩, 靶丸内的核燃料达到高温和高密度

引用格式: 王峰, 关赞洋, 理玉龙, 等. 基于神光Ⅲ装置的光学诊断系统介绍. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 065205
Wang F, Guan Z Y, Li Y L, et al. Optical diagnostic systems based on Shenguang III (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 065205, doi: 10.1360/SSPMA2018-00017

的热核反应条件, 产生聚变反应, 聚变燃料被约束的时间约为 100–200 ps. 聚变反应将释放大量的中子、带电粒子和 γ 光子^[3]. 这些聚变产物携带了靶丸内部燃料的燃烧和等离子体状态的信息, 因此应用聚变产物诊断技术可测量内爆过程和聚变燃烧的许多特性参数. 大部分带电粒子将在高密度区被慢化, 甚至完全沉积在燃料区, 无法到达探测器, 而高能中子和伽马射线具有很强的穿透本领, 绝大部分高能中子和伽马射线能无碰撞地离开燃料区到达探测器, 从而保留了燃料区聚变反应的全部信息. 聚变反应的峰值时刻对于靶丸能量吸收、等离子体的状态非常敏感, 中子或伽马射线产额随时间的变化反映了燃料区的聚变反应历程, 是热核反应的重要诊断技术之一^[4,5]. 另外, 聚变反应过程中还包含了峰值压缩时刻的相关信息——在压缩过程中, 外部的一些不可控的干扰因素, 如靶丸表面的缺陷、辐照的不均匀等会通过流体力学不稳定性放大从而导致壳层中的物质混合到燃料的芯部, 这会造成聚变反应速率的大幅下降, 因此对聚变反应速率的诊断还可获得混合方面的重要信息.

在可利用的两个诊断参数中, 伽马射线不存在飞行时间的展宽, 用其测量聚变反应速率的方法更加直接, 但伽马射线的产额极低, 仅为中子产额的十万分之一左右, 所以在低产额的情况下该项技术是不适用的^[6,7]. 高能中子更适合在低产额下测量聚变反应速率^[8]. 在神光 III 原型装置上, 聚变中子产额约为 10^{10} 量级, 处于利用高能中子诊断聚变反应速率的理想范围内. 设计应用在原型上的聚变反应速率测量系统具备以下功能: (1) 利用聚变反应发射的中子测量热核聚变燃烧的历程; (2) 测量聚变反应速率, 了解激光靶耦合、燃料混合对内爆压缩的影响; (3) 对热核燃烧峰值与激光脉冲或腔内辐射温度峰值时刻进行时间关联测量.

惯性约束聚变研究中, 激光与等离子体耦合过程的吸收、散射和各种非线性相互作用过程是二者相互作用的基本研究内容. 因此, 精确诊断这些物理过程的变化规律具有深远的意义, 不仅能够深化对激光等离子体相互作用的物理模型和物理规律的认识, 还可以为检验激光等离子体相互作用数值模拟程序提供物理数据.

激光等离子体相互作用产生的散射主要是受激布里渊散射(Stimulated Brillouin Scattering, SBS,

(351±3 nm)和受激拉曼散射(Stimulated Raman Scattering, SRS, 400–700 nm)^[9,10]. 研究发现, 这两种散射在入射激光聚焦透镜范围内及其附近的散射均占主导地位. 散射光的特性能够反应等离子体状态随时间的演化过程, 和等离子体的状态变化密切相关. 但另一方面散射光会降低激光能量的吸收和激光等离子体的耦合效率, 降低辐射场的温度并影响辐射场的对称性^[11]. 所以, 对散射光的能量和时间演化过程的精确诊断具有深远的意义. 其中背向散射的诊断又主要分为两种: 聚焦透镜范围的散射(全孔径背向散射)和聚焦透镜附近的散射(近背向散射). 神光 III 原型和主机装置上已经建立了完整的全孔径散射诊断系统(Full Aperture Backscattering System, FABS)和近背向散射诊断系统(Near Backscatter System, NBS).

2 VISAR

2.1 VISAR测速原理

传统的位移干涉仪是用一束频率已知的光与携带多普勒频移的光束混频, 并用探测器记录其强度, 根据记录的正弦波波数(即条纹数)和初始频率求得多普勒频移量, 进而求得探测面速度. 但这种方法产生的信号频率与测量面速度成正比. 测量面速度较高时, 产生的信号频率将超出有检测仪器的频率响应范围, 因此只能在低速范围内进行测量.

成像型VISAR在速度测量时主要利用了光学多普勒效应和光混频技术——样品表面在冲击波作用下运动时, 入射到样品表面的激光频率将随样品表面运动速度的变化而产生多普勒频移. VISAR采用的干涉仪为图1所示的Mach-Zehnder结构, 携带多普勒频移信息的反射光由分束镜分为两束, 一束经过加了标准具的延迟支路与另一束未加标准具的参考支路在第二个分束镜混频后进入记录系统, 这样得到的差拍频率变化是由两个不同时刻的速度差引起的, 与测量面速度无关, 解决了频率响应问题, 大幅提高了可测量的速度范围^[12].

2.2 系统光路

成像型VISAR主要分为探针光源、成像系统、干涉系统和记录系统4部分.

探针光源在采集高速信号时要满足条纹相机光电

图 1 (网络版彩图)VISAR干涉仪示意图

Figure 1 (Color online) VISAR interferometer.

响应要求, 所以使用的激光器为脉冲激光器. 激光器的输出波长要偏离打靶激光来避免打靶激光对测量的干扰. 激光驱动冲击波的诊断时间尺度为纳秒量级, 激光器采用外触发工作方式来保证探针光与打靶激光同步^[13].

成像系统主要用于将靶点收集的信号光送入干涉系统, 并最终成像在记录面上以实现空间分辨的速度测量. 干涉系统采用Mach-Zehnder结构, 通过在两束光之间引入一段时间延迟, 并调节两束光之间的夹角, 产生垂直于记录狭缝并携带差拍信号的干涉图样. 为解决条纹丢失对测量的影响, 采用了双灵敏度结构.

成像系统和干涉系统的光路如下图2所示, 其中BS₁–BS₆是分束镜, L₁–L₁₁是透镜, M₁–M₁₅是反射镜, IP₁–IP₆是6个像面, COM₁和COM₂是相差补偿镜, blast window是成像系统前面的保护玻璃, vacuum window是封真空的保护玻璃, 可以保护成像系统的光学透镜在打靶时不被损伤. 系统工作过程为: 从光纤发出的探测激光依次经过L₁₁, COM₁, BS₁, M₂, M₁, vacuum window, L₂, L₁, blast window到达靶点(TCC), 其中BS₁为1:1分束镜, 探测激光在此处能量损失1/2. 由靶点反射的光由L₁收集并准直, 然后依次经过L₂, vacuum window, M₁, M₂, BS₁到达BS₂. BS₂为1:1分束镜, 将光束分为相互垂直的两部分, 分别进入支路一和支路二. 在支路一中, M₃, M₄组成一个灵活的调整机构, 可以方便地将入射光轴调整到与支路一光轴重合. IP₁为一次像面, L₃的焦平面与IP₁重合, 将入射光变为平行光进入由M₅, M₆, BS₃, BS₄组成的干涉仪. BS₃为1:1分束镜, 倾角4.5°, 将光等分为两部分. 两束光分别经M₅, M₆反射后在BS₄处汇合, 然后进入L₄. BS₄也是1:1分束镜, 光能量在此处损失1/2. L₄将从干涉仪出来的干涉光会聚到二次像面IP₂. L₅, L₆为中继透镜, 光路在二者之间为平行光,

图 2 成像型VISAR系统光路图^[12]

Figure 2 Optical system of imaging VISAR [12].

IP₃为最终像面即为条纹相机狭缝. M₇, M₈为调整机构, 可调节光路以使入射光轴与条纹相机光轴重合. 在支路二中, 首先要经过一个补偿镜COM₂, 然后反射镜M₉将垂直摆放的两个支路变为平行摆放, M₁₀, M₁₁为调整机构, 接下来的光路与支路一类似. 光学系统要求物方分辨10 μm, 放大5倍后对应像方分辨50 μm, 其倒数对应20 lp/mm.

记录系统则用来记录由于差拍产生的、具有时间分辨的条纹图^[12]. 传统VISAR利用光电倍增管和示波器进行记录, 只能对待测面上的一点或多点进行测量, 成像型VISAR将条纹相机和CCD组成的成像系统耦合进测量系统, 通过光路系统将待测面成像在条纹相机狭缝上进行记录, 并且在干涉光路中有意使两支路有微小夹角(4.5°), 此时干涉环会变成直线条纹族——实际上是离环纹很远, 曲率半径很大的一系列圆条纹. 待测面速度发生变化时, 这些远场直线条纹族会相对于它们的中心向外或向内移动, 条纹相机记录下条纹的变化经过后续的速度处理即可得到待测面的速度变化情况^[14].

2.3 双灵敏度测速技术

根据速度干涉仪和VISAR原理, 我们记录的是 $u(t)$ 和 $u(t-\tau)$ 两个时刻多普勒信号光产生的拍频. 引入参数 $F_v = \frac{\lambda}{2\tau}$, 其中 λ 是激光器的波长, τ 指的是由标准具引起的延迟时间. 此参数的物理含义为示波图上每个条纹对应的速度变化, 即速度改变多少才产生一个条纹, 称为速度灵敏度. 但是这里存在一个问题: 在待测面速

度起跳时刻($t=t_0$), 参考支路(短程光)光束已经携带了由起跳速度产生的多普勒频移信息, 但此时与之混频的延迟支路(长程光)光束仍然是待测面起动前的信息. 即在 $t_0-(t_0+\tau)$ 的时间内, VISAR为位移干涉仪. 在这个时间内, 冲击波和爆轰波与样品相互作用产生的波剖面结构会产生很大变化, 是一个典型的速度突变过程, 条纹会出现整数级的变化(或称条纹丢失). 成像型VISAR采用双灵敏测量系统来解决这一问题, 如光路所示, 通过使用厚度不同的标准具使得两支路的延迟时间不同以达到改变速度灵敏度的目的, 因为测量的是同一位置的速度, 对比两路的结果可以精确计算出丢失的条纹数, 使测量结果更为准确.

2.4 实验结果分析

图3所示为几种典型情况下的VISAR结果. 通常条纹图由平行条纹区和条纹移动区组成. 平行条纹区为探针光的反射信号, 此时冲击波还未产生, 干涉仪两支路均无多普勒频移, 由于VISAR条纹图记录的是速度变化情况, 所以此时的条纹平行于时间轴, 无速度变化. 条纹移动区是探针光在冲击波阵面的反射信号,

因为冲击波阵面是运动界面, 反射光产生多普勒频移, 经干涉仪产生拍频, 产生相对于时间变化的条纹. 图3(a)为高速冲击波的VISAR图样, 在速度跳变处会丢失整数条纹, 根据两支路的结果估算出条纹丢失数并结合理论预估结果, 利用双灵敏度测速来确定真实速度. 图3(b)为低速运动下的VISAR条纹, 无条纹跳变产生, 最终得到的速度曲线与条纹图的波形一致, 表现出VISAR“所见即所得”的特性. 图3(c)为石英与液D材料双冲击波测速结果, 图中有一明显的分界面, 即为冲击波出现的时刻. 图3(d)为双铝台阶预热效应实验的条纹图. 这些表明VISAR在高速、低速、透明介质以及固体表面的测速中均有广泛的应用.

3 惯性约束聚变反应速率测量

3.1 诊断原理

在ICF实验中, 靶丸内的聚变燃料(DD或DT, 即氘氚)发生的聚变反应为^[5]:

图3 (网络版彩图)几种VISAR结果. (a) 石英材料冲击波调速实验; (b) 激光驱动准等熵压缩实验; (c) 石英与液D材料双冲击波测速实验; (d) 双铝台阶预热效应实验

Figure 3 (Color online) Several results of VISAR. (a) The speed regulation experiment of shock wave in quartz material; (b) the quasi-isentropic compression experiment of laser driven; (c) the velocity-measurement experiment on double shock wave of quartz and liquid D materials; (d) the experiment on double-aluminum-step preheating effect.

$D+T \rightarrow \alpha(3.56\text{ MeV}) + n(14.03\text{ MeV})$, 分支比约100%;

$D+T \rightarrow 5He + \gamma < (16.7\text{ MeV})$, 分支比约 10^{-5} .

反应产物中的带电粒子在等离子体中被慢化阻止, 而中子不带电, 具有很强的穿透能力. 从高密度区域冲出的中子轰击离靶非常近的闪烁体. 有机闪烁体中富含H原子, 中子与H原子发生弹性散射, 散射产生的反冲质子在闪烁体内通过电离被迅速慢化, 质子的部分电离能被闪烁体以光的形式释放出来, 该光信号保留了聚变燃烧速率的所有信息, 光学成像系统对释放出来的光进行收集, 闪烁体发射的光脉冲通过光学系统中继到光学条纹相机阴极, 通过扫描变像管进行时空变换, 对光脉冲进行高时间分辨的记录. 诊断系统主要基于快上升时间的塑料闪烁EJ232, 该闪烁体受激闪烁发光的上升时间约为20 ps, 衰减时间约为1.3 ns, 而聚变反应的持续时间约为100–200 ps, 所以中子脉冲激发闪烁体发光, 光脉冲的前沿就包含了中子脉冲或聚变燃烧过程的全部信息.

3.2 系统参数

实验用靶由金柱腔和充DT气体的靶丸两部分组成. 柱腔长1700 μm , 直径为1000 μm , 激光注入孔直径为650 μm . 靶丸由DT气体、玻璃球壳和CH烧蚀层组成, DT气体气压为1.0–1.5 MPa, 玻璃靶球内径为380 μm , 厚度为2 μm , CH烧蚀层厚度有13和19 μm 两种. 神光III原型装置上八束三倍频激光由上下各四束从柱腔两端的注入孔注入腔内, 三倍频激光能量约为8000 J, 脉宽为1 ns.

聚变反应测量系统如图4所示^[15], 聚变反应产生的高能中子冲出后与塑料闪烁体发生作用, 激发产生

350–450 nm的宽谱光, 因此光学成像系统上采用了消色差技术. 光学成像系统把光信号收集之后通过光纤传输至靶室外的条纹相机进行记录. 在这个系统里, 闪烁体的规格为: 直径6 mm, 厚度1 mm, 安装在鼻锥内. 收光系统采用1/3的放大倍数. 相机的狭缝宽度调整至100 μm . 另外, 在光学系统和条纹相机之间加上了遮光罩起到散射光屏蔽的作用, 以此来进一步减小杂散光对测量的影响.

3.3 实验系统设计

聚变反应速率测量系统主要由三部分组成: 转换体、光学成像系统和光学条纹相机系统.

3.3.1 转换体

转换体分为闪烁体和鼻锥两部分, 前者的作用是将高能中子转换成光信号以便于记录和分析, 后者则是将来自于靶点的X射线及散射光屏蔽同时阻挡飞散的打靶碎片, 而且闪烁体后面也加装了铅玻璃来进一步降低X射线对实验测量的影响. 为了改善当前实验条件下信号较弱的情况, 在鼻锥后界面上还加镀了一层Al反射膜. 闪烁体到靶点的距离以及闪烁体的面积会影响入射到闪烁体的中子通量. 在神光III系统中, 闪烁体的面积是固定的, 但为了满足不同中子产额条件下的实验测量, 将闪烁体放在了一个采用伸缩式结构的鼻锥内从而使闪烁体到靶点的距离可调. 转换体的结构如图5所示.

3.3.2 光学系统

光学系统的时间弥散、透过率和收光系数是影响

图 4 (网络版彩图)聚变反应测量系统示意图^[15]

Figure 4 (Color online) Diagram of fusion-reaction diagnostic system [15].

图 5 转换体结构^[15]

Figure 5 Structure of transformation [15].

测量系统性能的主要参数. 时间弥散对系统的时间响应有影响, 透过率和收光系数则影响系统的灵敏度. 神光III收光系统中, 因为系统的光路过长, 所以采用了透射式成像组件, 通过像面传递的方式将闪烁体产生的光信号传递至条纹相机光阴极以减小光学元件的口径. 而系统的时标则是从打靶激光器光路中引光, 再将标准具插入光路以获得等时间间隔的脉冲序列, 将得到的脉冲序列通过光纤引入条纹相机得到, 光路图如图6所示. 发光信号由透镜组 L_1 收集并成像于 IP_1 , 其为透镜组 L_2 的焦平面, L_2 将收集的光进行准直并通过法兰上的输出窗口出射转换体部分与透镜组 L_1 , L_2 作为一个整体通过伸缩机构和靶室法兰相连. 出射的信号光再经过反射镜和透镜组 L_3 成像于条纹相机狭缝面上.

3.3.3 记录系统

记录系统由光学条纹相机和CCD组成, 可将光学信号转换成电学信号并进行放大记录, 同时将时间信息转换成空间信息. 条纹相机时间记录长度要大于3 ns以完整记录中子发射的全部时间过程. 闪烁体的

发光波长为350–450 nm, 所以条纹相机谱响应范围为200–800 nm.

3.4 测量结果

3.4.1 聚变反应历程信号测量

图7给出的测量结果中^[16], 各项参数如下: 闪烁体直径6 mm, 厚度1 mm, 距离靶丸2 cm; 收光系统放大倍数1/3; 相机狭缝100 μm , 扫速速度约为每通道3 ps. CH烧蚀层厚度分别为9, 13和16 μm 的DT靶丸. 图中上半部分为发光信号, 下半部分为时标光序列. 可以看出, 随着CH烧蚀层厚度的增加, 闪烁体发光信号与时标光信号之间的时间关系也在改变.

3.4.2 聚变反应速率

条纹相机记录到的发光信号为中子发射时间过程和闪烁体响应时间的卷积, 而聚变反应历程包含在发光信号的上升沿中, 需对上升沿信号去卷积才能获得聚变反应历程. 考虑到闪烁体的上升时间为20 ps, 衰减时间常数为1.2 ns, 而且聚变反应的时间很短(100–200 ps), 所以去卷积可近似处理为去叠加. 设图中第*i*个像素点的强度为 s_i , 对应的中子相对强度为 n_i , 闪烁体发光呈指数衰减, 衰减时间常数为 τ , 则可利用下式去卷积, 得到中子强度随时间的变化历程从而得到聚变反应历程^[16].

$$n_i = s_i - \sum_{j=0}^{i-1} n_j \exp\left(-\frac{t_i - t_j}{\tau}\right).$$

聚变反应历程反映中子数随时间的相对分布, 而聚变反应速率与记录到的中子数呈比例关系, 根据Cu

图 6 (网络版彩图)光学成像系统^[15]

Figure 6 (Color online) Optical imaging system [15].

图 7 (网络版彩图)聚变反应历程信号^[16]. (a) CH烧蚀层厚度为9 μm ; (b) CH烧蚀层厚度为13 μm ; (c) CH烧蚀层厚度为16 μm
Figure 7 (Color online) Signal of fusion reaction history [16]. (a) The thickness of CH ablation is 9 μm ; (b) the thickness of CH ablation is 13 μm ; (c) the thickness of CH ablation is 16 μm .

活化法测得聚变反应期间的中子总产额与聚变反应历程在时间上的积分可得到比例系数从而得到聚变反应速率随时间的分布,如图8所示.可以看出,聚变速率峰值约为 $10^{20}/\text{s}$,反应持续时间约为120 ps.

4 背向散射光诊断系统

4.1 诊断原理

在激光打靶过程中发生激光等离子体相互作用,入射光波能共振地衰变为一个背向散射光波和一个等离子体中的本征波模——离子声波或电子等离子体声波.入射激光在离子声波上的散射为SBS,在电子等离子体声波上的散射为SRS,这造成SBS与SRS的散射光频率差别较大.在诊断系统中,主要利用这一特性对二者进行分离,通常是在光路中加入特殊设计的滤片来实现.这里采用的是二向色镜进行分离,其在330–

图 8 (网络版彩图)不同CH烧蚀层厚度对应的聚变反应速率

Figure 8 (Color online) Fusion reaction rate corresponding to different thickness of CH shell.

400 nm (SBS)波段的反射率大于98%,在415–950 (SRS)波段的透射率大于93%.

4.2 神光III原型背向散射光测量系统

4.2.1 全孔径背向散射测量系统

FABS的系统图如图9所示^[17],由终端光学组件出射的散射光经由离轴抛物面镜 M_0 进行收光并反射,由 M_1 折转后进入 M_2 , M_3 组成的延迟支路以使经 M_0 反射的散射光焦点位于真空滤波器 F_1 , F_2 的小孔位置.光束经由 M_4 反射后通过 BS_1 进行分光处理,将SBS和SRS分为两支路在离轴抛物面镜的焦点处进入滤波器,为避免在焦点处的高能散射光将空气电离,焦点位置两侧必须位于真空中.准直透镜 L_2 和 L_4 是为了将散射进行缩束,防止光束口径过大.二向色镜 BS_2 对351 nm的光具有很高的反射率,可对SBS进一步提纯. BS_3 和 BS_5 为取样镜,分别对散射光取样5%进入快光电二极管记录散射光的时间特性,经准直透镜 L_3 和 L_5 汇聚耦合进光纤并传输至光谱仪,经光谱仪分光再由条纹相机记录光谱随时间变化的历程.两支路中大部分的能量经 BS_4 和 BS_6 透射由能量卡计记录.

4.2.2 近背向散射系统

近背向散射光诊断系统利用光学系统收集和传递靶点附近的背向散射光并对光学部分的能量传输效率进行精确标定,用能量卡计上获得的光能量数据和传输效率反推出靶点的散射光能量大小.系统结构如图10所示^[18],环状离轴椭球镜安装在靶室内的打靶透镜边缘,从靶点(TCC)出发的散射光经由椭球镜收集并收束再通过靶室法兰口的密封玻璃窗口传输至靶室外的诊断包.

诊断包内有一楔形反射镜用于光路折转和能量衰

图 9 (网络版彩图)全孔径背向散射诊断系统光路图

Figure 9 (Color online) Abridged general view of full-aperture backscatter light diagnostic system.

图 10 (网络版彩图)近背向散射光诊断系统示意图

Figure 10 (Color online) Schematics of near backscatter light diagnostic system.

减, 前表面镀有反射率较低的介质膜, 能量很强(>10 J)的散射光在经过楔形镜时会有较大一部分能量透射过去, 降低能量, 避免对后续光学元件的损害. 经过楔形镜的反射光通过二向色镜进行分光, 分为SRS和SBS两支路, 两支路中分别组建透镜组对靶点进行二次成像, 形成大小合适、强度均匀的光斑以利用能量卡计进行收集. 诊断包为密闭状态且在靶室外, 免除了外界杂散光的干扰.

4.3 神光III主机背向散射诊断系统

整个神光III主机诊断系统的设计思路与原型相同, 但神光III主机装置相较于原型装置能量更高, 而且打靶光路排布、打靶透镜、出光位置等都有变化. 主机装置的口径变得更大, 除此之外还主要有以下变化^[19]:

(1) 打靶透镜更换为楔形透镜.

(2) 取光位置变为III型镜后取光.

(3) 打靶光路增多.

(4) 标定光路的变化.

前两个变化对全孔径背向散射光诊断系统的影响较大, 第三个变化影响近背向诊断系统, 第四个是量化方面的要求.

4.3.1 光路与空间滤波器

主机诊断光路元件更多, 同时具有能量、光谱、时间过程的诊断能力. 由于将打靶透镜变为了楔形透镜, SBS光和SRS光在背反收集光路中的聚焦位置在轴向和径向都有明显的偏差. 如图11为小孔附近的光路, 可以看出, 351 nm光的聚焦位置最先出现, 700 nm左右的光聚焦位置偏下, 解决办法是在整个光束腰的位置放置一个矩形的小孔, 既能保证光束全部通过, 又能最大限度发挥小孔限光的作用.

图 11 (网络版彩图)空间滤波器小孔附近光路图

Figure 11 (Color online) Optical path distribution near space filter.

4.3.2 光谱采集系统

原型装置上能够同时采集SBS和SRS光谱,但在主机上,因为聚焦位置的差别,两种光谱在空间上有明显的分离,分离的距离可达6 mm,所以使用光纤系统只能采集一种光谱.解决办法是采用一个散射板使宽光谱的光重新分布,经由一套聚焦系统采集散射光,再用光纤、谱仪和条纹相机组成的记录系统记录光谱.

4.3.3 带缺损的近背向散射系统收光盘

主机近背向诊断系统的收光盘采用4块拼接和轻镜技术以满足实验需要.由于主机打靶激光为48路,远超原型的8路设计,每一路都存在一路分离角度很小的剩余基频和二倍频光,强度在1000 J以上,是不能忽视的直接杂散光.在A6S4路打靶光路上存在两路杂散光且与近背向的SRS, SBS同时、同向、同光谱,可以直接打坏金属镜.但如果采取美国国家点火设施(National Ignition Facility Project, NIF)的方式将镜子挖空会使镜子的面型遭到破坏,后续诊断无法进行.解决办法是在金属镜上长出两个吸收体以达到在不破坏镜子面型的前提下最大程度地吸收掉杂散光,在后续光路标定时将吸收体的影响标出.

4.3.4 标定系统变化

标定技术分为强度标定和光谱标定两大类,在背

向散射背散诊断系统里,需要一束从靶点出射并与打靶光束F数相同的锥形光束.在原型装置上,光斑在出射光束的内切位置.但是主机装置的靶球直径要大得多,借助专为主机研制的通用诊断搭载平台,在通用诊断系统搭载平台(Diagnostic Instrument Manipulator, DIM)上搭建了对背向散射系统全光斑标定的光学系统.该系统可以在近背反、全孔径背反和不同偏振态之间切换.

整个标定光路由激光器、DIM、缩束系统、光束镜头组成.激光束输出的 $\phi 50$ mm光通过50 mm转10 mm的缩束系统,变成一个直径为10 mm的光束.这个光束通过一个反射镜进入两个可切换的镜头将光束变为F数为2和11的锥形光斑.F数为11的光束可以全部通过终端光学组件进入全孔径诊断系统从而在记录处获得全孔径背反的单波长透射率,要获得SBS光在351 nm和SRS光在527 nm的透射率,只需调整输入光的波长即可.再结合白光的标定结果即可获得SRS的全波段透过率.

5 结论

本文介绍了三种基于神光III原型和主机的光学诊断系统,对各个系统的诊断原理、组成结构做了介绍并简要分析了部分实验数据. VISAR可分为探针光源、成像系统、干涉系统和记录系统,采用双灵敏度测速技术,在冲击波诊断领域有广泛的应用.惯性约束聚变速率测量系统由闪烁体、鼻锥、光学成像系统和条纹相机组成,可对聚变过程的许多特性参数进行测量,对聚变反应的时间过程进行高时间分辨率测量.背向散射诊断系统分为全孔径背向散射诊断系统和近背向散射诊断系统,并对主机相较于原型的诊断系统做出的改进进行了介绍.通过对散射光中SBS和SRS的能量、时间过程和光谱的测量可以加深对激光等离子体作用过程的了解.

参考文献

- 1 Hu S L. Laser Interferometry for Measuring Velocities (in Chinese). Beijing: National Defence Industry Press, 2001 [胡绍楼. 激光干涉测速技术. 北京: 国防工业出版社, 2001]
- 2 Xu T, Wang F, Peng X S, et al. Optical system design of imaging velocity interferometer system for any reflector (in Chinese). Acta Opt Sin, 2011, 31: 0722001 [徐涛, 王峰, 彭晓世, 等. 成像型任意反射面速度干涉仪系统的光学系统设计. 光学学报, 2011, 31: 0722001]

- 3 Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility. *Phys Plasmas*, 2004, 11: 339–491
- 4 Glebov V Y, Meyerhofer D D, Sangster T C, et al. Development of nuclear diagnostics for the National Ignition Facility (invited). *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 10E715
- 5 Stoeckl C, Glebov V Y, Roberts S, et al. Ten-inch manipulator-based neutron temporal diagnostic for cryogenic experiments on OMEGA. *Rev Sci Instrum*, 2003, 74: 1713–1716
- 6 Moran M J, Lerche R A, Mant G, et al. Optical lightpipe as a high-bandwidth fusion diagnostic. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 10E718
- 7 Mack J M, Caldwell S E, Evans S C, et al. Multiplexed gas Cherenkov detector for reaction-history measurements. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 10E728
- 8 Lerche R A, Phillion D W, Tietbohl G L. 25 ps neutron detector for measuring ICF-target burn history. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66: 933–935
- 9 Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain. *Phys Plasmas*, 1995, 2: 3933–4024
- 10 Stevenson R M, Suter L J, Oades K, et al. Effects of plasma composition on backscatter, hot electron production, and propagation in underdense plasmas. *Phys Plasmas*, 2004, 11: 2709–2715
- 11 Fernández J C, Bauer B S, Cobble J A, et al. Measurements of laser-plasma instability relevant to ignition hohlraums. *Phys Plasmas*, 1997, 4: 1849–1856
- 12 Peng X S. Development of An Imaging Velocity Interferometer System for Any Reflector (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Chengdu: Sichuan University, 2008 [彭晓世. 成像型任意反射面速度干涉仪系统研制. 硕士学位论文. 成都: 四川大学, 2008]
- 13 Peng X S, Wang F, Liu S Y, et al. Development of an imaging velocity interferometer system for any reflector (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2009, 29: 3207–3211 [彭晓世, 王峰, 刘慎业, 等. 成像型任意反射面速度干涉仪研制. 光学学报, 2009, 29: 3207–3211]
- 14 Peng X S, Wang F, Tang D R, et al. Shock wave velocity measurement in quartz using an imaging velocity interferometer for any reflector (in Chinese). *J Optoelectron Laser*, 2011, 22: 1401–1404 [彭晓世, 王峰, 唐道润, 等. 利用成像型任意反射面速度干涉仪测量石英中的冲击波速度. 光电子激光, 2011, 22: 1401–1404]
- 15 Peng X S, Wang F, Liu S Y, et al. Design of a fusion reaction-history measurement system with high temporal resolution (in Chinese). *Nucl Electron Detect Tech*, 2010, 30: 413–417 [彭晓世, 王峰, 刘慎业, 等. 高时间分辨的聚变反应历程测量系统设计. 核电子学与探测技术, 2010, 30: 413–417]
- 16 Peng X S, Wang F, Tang D R, et al. Measurement of inertial confinement fusion reaction rate (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2011, 23: 2197–2200 [彭晓世, 王峰, 唐道润, 等. 惯性约束聚变反应速率测量. 强激光与粒子束, 2011, 23: 2197–2200]
- 17 Wei H Y, Peng X S, Xu T, et al. Full aperture backscatter light diagnostic system on Shenguang-III prototype laser facility (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2012, 24: 2773–2777 [魏慧月, 彭晓世, 徐涛, 等. 神光III原型装置的全孔径背向散射诊断技术. 强激光与粒子束, 2012, 24: 2773–2777]
- 18 Xu T, Peng X S, Wei H Y, et al. Near backscatter light diagnostic system on SG-III prototype laser facility (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2012, 24: 2853–2857 [徐涛, 彭晓世, 魏慧月, 等. 神光III原型装置的近背向散射光诊断系统. 强激光与粒子束, 2012, 24: 2853–2857]
- 19 Wang F, Peng X S, Xu T, et al. Backscattered light diagnostic technique based on Shenguang-III laser facility (in Chinese). *Chin J Lasers*, 2015, 42: 0902011 [王峰, 彭晓世, 徐涛, 等. 基于神光III主机的背向散射光诊断技术. 中国激光, 2015, 42: 0902011]

Optical diagnostic systems based on Shenguang III

WANG Feng^{*}, GUAN ZanYang, LI YuLong, PENG XiaoShi, XU Tao, WEI HuiYue,
LIU XiangMing, ZHA WeiYi, LIU YongGang & MEI Yu

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

Optical diagnostic system plays an important role in inertial confinement fusion (ICF) experiment. Some key physical quantities and parameters in fusion can be diagnosed intuitively. In this review, three typical diagnostic systems on Shengang III facility are introduced, including imaging velocity interferometer system for any reflector (VISAR), fusion-reaction diagnostic system and backscatter light diagnostic system. VISAR can be used to measure velocity of free surface or shock wave traveling history in transparent media, which is an important diagnostic technique for shock wave velocity regulation, material compression characteristics and radiation temperature measurement. The fusion reaction-history diagnostic system can be used to accurately measure the fusion rate of ICF experiment. It's a key diagnostic technique to study implosion dynamics and understand the mixed effect. Backscatter light diagnostic system is capable to measuring the energetic quotient stimulated by laser and plasma interaction (LPI), which produce important supports for calculating the coupling efficiency of driven laser and target.

VISAR, fusion reaction rate, backscatter light diagnosis

PACS: 52.50.Lp, 62.50+p, 78.47.je, 52.70.Kz

doi: [10.1360/SSPMA2018-00017](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00017)