

doi: 10.3788/gzxb20174608.0811001

# 基于神光 III 原型的双轴速度干涉仪

王峰, 纪腾, 徐涛, 理玉龙, 景龙飞, 魏惠月, 彭晓世

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 在激光惯性约束聚变研究中不对黑腔和靶丸做额外处理的条件下, 靶丸的早期驱动对称性一直缺少直观的观测手段. 介绍了基于神光 III 原型装置发展的双轴任意反射面速度干涉仪技术及相应的实验结果. 通过在靶丸内部安装小反射镜的方式, 获得靶丸赤道及极区的冲击波速度历程. 根据材料的反射率及其受 X 射线的影响程度, 确定 Al 为现阶段反射镜的合适材料. 对汇聚几何效应下的数据判读问题进行了分析, 发现靶装配精度对该技术的影响很大. 通过实验完成了双轴 VISAR 诊断技术的探索, 可为进一步发展双轴速度干涉仪和多轴速度干涉仪的工作提供参考.

**关键词:** 双轴; 任意反射面速度干涉仪; 干涉仪; 冲击波; 汇聚几何

中图分类号: O52; O53

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)08-0811001-7

## Two-axis Velocity Interferometer Technique Based on Shenguang-III Prototype Laser Facility

WANG Feng, JI Teng, XU Tao, LI Yu-long, JING Long-fei, WEI Hui-yue, PENG Xiao-shi  
(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract:** There is no useful diagnostic technique to measure the shock wave for the target asymmetry in early implosion without extra processing to black cavity and target during the study of laser inertial confinement fusion. The two-axis velocity interferometer system for any reflector was developed based on Shenguang-III prototype laser facility and the experimental results were introduced. Velocity history of shock wave in equatorial and polar of target was obtained by installing small mirror in the target. According to the reflectivity of the material and the influence by the X ray, it is determined that Al is the suitable material for the mirror at present. The difference between the plane shock loading and spherical shock loading was compared. It is found that the accurate for target equipment is the main reason for fewer signals. The diagnostic technique of two-axis velocity interferometer system for any reflector was explored through the experiment, which would give a reference to develop the two-axis velocity interferometer system or multi-axis velocity interferometer system.

**Key words:** Two-axis; Velocity interferometer system for any reflector; Interferometer; Shock wave; Convergent geometry

**OCIS Codes:** 110.3175; 120.7250; 110.2970; 120.4820

## 0 引言

辐射不对称性是惯性约束聚变内爆过程的重要物理量, 良好的辐射驱动对称性是实现 (Inertial Confinement Fusion, ICF) 实验室点火的关键条件之一<sup>[1-8]</sup>. 事实上, 由于有限的驱动激光束数、黑腔构型等因素, 黑腔烧蚀获得的 X 射线辐射场肯定存在一定程度的不均匀性, 使得靶丸在压缩时偏离一维球对称状

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11305158) 资助

第一作者: 王峰 (1975-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为激光 ICF 中冲击波物理相关实验. Email: xiaozei7566@163.com

通讯作者: 理玉龙 (1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为激光聚变光学诊断. Email: 2013may6th@sina.com

收稿日期: 2016-12-15; 录用日期: 2017-03-23

<http://www.photon.ac.cn>

态. 通过控制激光条件(双环注入、束间能量转移等)及约束黑腔相关参数可以有效地将辐射不对称性控制在合适水平. 此外, 在 ICF 点火物理设计中, 在压缩阶段需要精确设计一系列冲击波来持续低熵压缩靶丸燃料层, 使之在内爆最后阶段获得较大的加速, 即冲击波精密调速实验技术<sup>[9-14]</sup>. 通过观测靶丸不同方向壳层被 X 射线烧蚀后形成的聚心冲击波传输时间和速度, 是冲击波定时实验技术的主要测量对象, 也可以判断靶丸被压缩时的不对称程度. 而该技术的主要诊断思路是利用现有任意反射面速度干涉仪 (Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR) 装置来诊断球形靶丸透明材料壳层内的冲击波速度. 通过在常用的钥匙孔 (keyhole) 靶上加装反射镜的方式, 可以将探针光分成不同部分, 从而诊断不同方向的冲击波传输特性, 即可称作双轴 VISAR 或多轴 VISAR 技术<sup>[15]</sup>.

为实现上述目的, 美国在国家点火装置 (National Ignition Facility, NIF) 的前期实验中进行了大量的冲击波调速实验, 利用双轴 VISAR 技术进行了多种实验<sup>[15]</sup>. NIF 上使用的双轴 VISAR 实验用靶是比较成功的靶型. 靶丸的壳层为 CH, 其内部充满液氘, 安装在靶丸内部的小导光锥筒分别配置赤道方向和极区方向的诊断孔, 利用安装在  $45^\circ$  斜坡上的小反射镜可将 VISAR 探针光一分为二, 分别传递到赤道和极区方向, 并将冲击波阵面反射的探针光返回到 VISAR 装置中, 获得了赤道和极区方向的冲击波传输、追赶图像, 为其冲击波调速实验奠定了关键的诊断基础.

为研究该实验技术的一些关键问题, 本文从诊断和制靶入手, 分析该实验技术中的难点, 并通过对该实验技术的探索, 研究激光器、制靶、诊断和数据分析全套环节, 为开展冲击波调速和内爆对称性实验奠定基础.

## 1 理论分析与模拟

在进行实际的实验设计之前, 依据已有的一些靶型、激光波形的基本信息, 对整个实验的数据以及可能出现的问题进行预估是非常有必要的. 利用 IRAD3D 程序对靶丸上赤道和极点两个方向的辐射流进行预估. 程序中采用腔靶参数为黑腔  $2\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ , 腔靶的注入孔 (Laser Entrance Hole, LEH) 为  $1\text{ mm}$ , keyhole 靶的锥顶直径  $1.24\text{ mm}$ , 靶丸直径  $1\text{ mm}$ . 激光参数为, 波长  $351\text{ nm}$ , 8 束注入, 每束参数  $400\text{ J}/3\text{ ns}$  (按平均值), LEH 处光斑直径为  $500\text{ m}$ . 根据已有的其他实验的参数, 根据布置在东经  $67.5^\circ$  北纬  $20^\circ$  位置上的平响应 X 射线探测器 (Flat X-Ray Detector, FXRD) 结果调节 IRAD3D 输入参数, 固定转换效率为  $0.8$ , 固定靶丸反照率为  $0.3$ . 目标是研究靶丸极点和赤道驱动温度不一致性的趋势, 以及测量的辐射温度与模拟的真实辐射温度的差别. 另外, 根据实际实验不考虑黑腔和 LEH 收缩和黑腔和 LEH 收缩  $10\%$  两种情况.

从图 1 可以看到, 由于腔靶很大, 靶球也很大, 所以, 会看到很大一部分的靶球和光斑. 而且, 从模拟结果看, 赤道和极点区域的辐射温度有明显的不同, 应该会有驱动不对称性的结果. 图 2 是依据其他先期实验给出的一个实验设计的辐射温度波形.  $0^\circ$  对应极点,  $90^\circ$  对应赤道. 该波形有预两个明显的台阶, 模拟中将选取肩部  $80\text{ eV}$  和顶部  $100\text{ eV}$  两个点来调整程序中的参数.

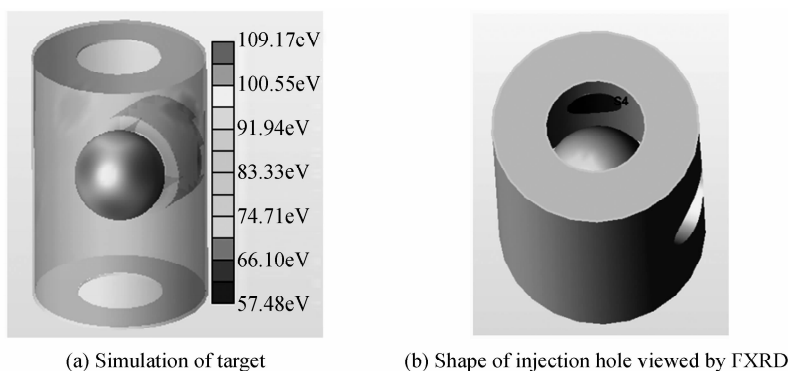


图 1 靶型及靶姿态的模拟图

Fig. 1 Simulation of target and its performance

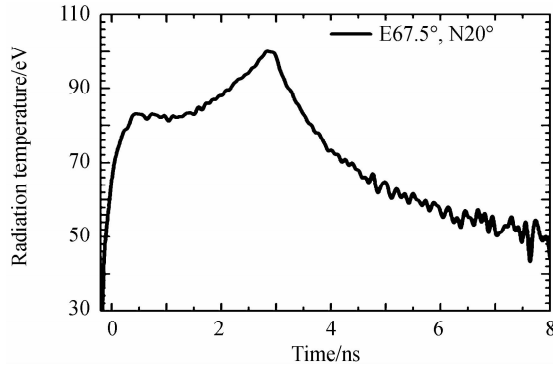


图2 FXRD 实际获得的辐射流数据

Fig.2 Radiation flux data obtained by FXRD

图3为不同时刻靶球上辐射温度沿角度扫描的结果.黑腔反照率在模拟程序中进行了调节,以达到与图2的输入条件相匹配的目的.可以看到,整个实验观测的0.5 ns和3 ns两个时刻,整个球上的辐射流分布是极其不均匀的.这也说明该实验可能会观测到比较明显的冲击波速度差别.图4是使用图2中辐射温度波形,并带入实际的靶参数,利用Multi1D程序模拟出的赤道面上靶内的流线图.由于极点的辐射流受周围环境影响太大,所以这里仅作赤道面的分析.靶丸材料由外向内Al/W/Al/CH的厚度设置依次是5 μm/2 μm/1 μm/70 μm,驱动波形与图2相同.从图4看到,冲击波在比较早的时候就传入CH,而后速度会一直增加.也就是说,观测时间点应该比较靠前.图5是赤道面上的速度预估.大约在0.8 ns左右,冲击波传出最后一个Al层,进入CH材料,可以在这个时刻观察到CH中的冲击波传输信号.理论上,可以观测0.5 ns到4 ns时间内的冲击波速度,速度大约从10 km/s上升到24 km/s.由于极点的辐射温度偏低,所以可以预计其速度会比极点小.实际中,由于制靶过程反射镜以及靶丸装配精度问题、汇聚效应影响等,很难观察到这么长时间的冲击波信号.这个理论计算的数据可以为后续分析提供指导.

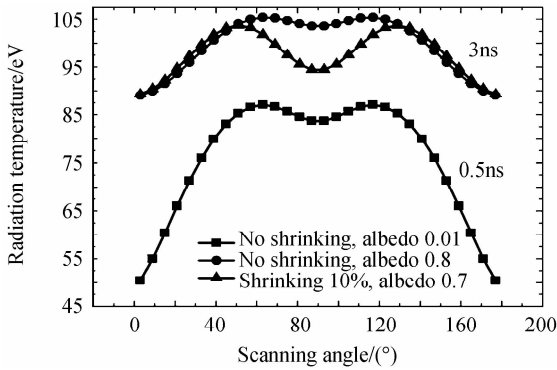


图3 不同时刻靶球上辐射流温度的角分布

Fig.3 Angular distribution of radiation flux temperature in different time of the target

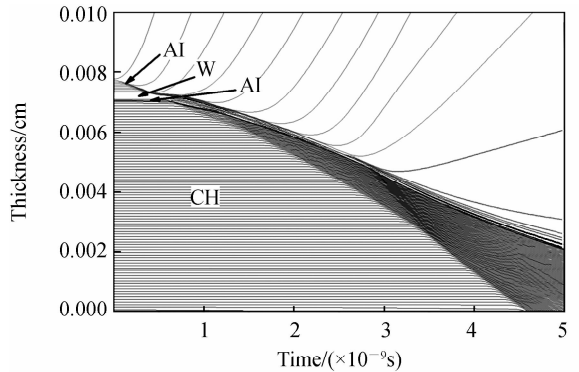


图4 靶丸赤道上的流线图

Fig.4 Streamline on the equator of target

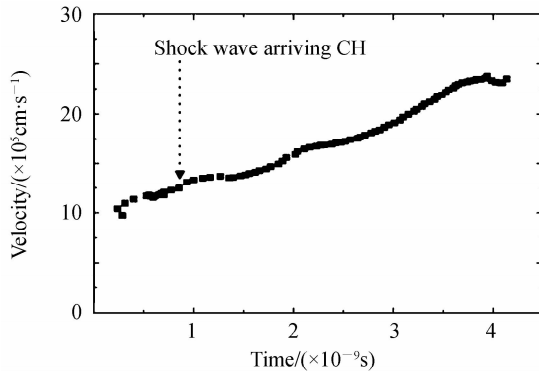


图5 从图4中流线图获得的赤道面上的冲击波速度曲线

Fig.5 Velocity curve of shock on equator obtained from streamline in Fig.4

## 2 实验概况

2015 年底,在神光 III 原型上首次开展双轴 VISAR 诊断技术探索.同时,推进复杂结构的双轴 VISAR 靶制作,判断靶设计和现阶段靶生产能力之间的矛盾和问题,确定现有原型 VISAR 装置的诊断流程.通过本次物理实验牵引,将着重解决复杂构型的双轴 VISAR 实验用靶的制作问题,包括靶丸内部微小结构导光锥的设计和制作、大小为 0.5mm 以下尺度的镀铝反射镜的制作和装配、多重结构件之间的高精度装配等(见图 6).

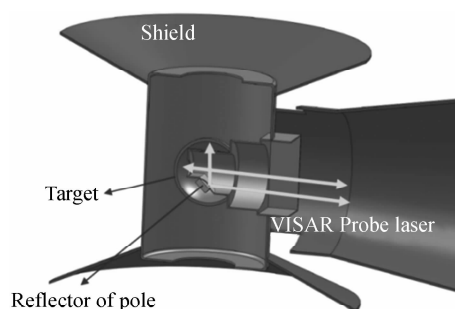


图 6 双轴 VISAR 靶结构示意图

Fig. 6 Diagram of two-axis VISAR target's structure

借鉴 NIF 使用的靶结构,神光 III 原型上的双轴 VISAR 靶实际上是一个简化的间接驱动内爆靶,只是在靶丸上添加了一个适用于 VISAR 观测的导光锥筒.在现有靶生产水平下,为了能充分地容纳靶丸和黑腔内部复杂的微结构,黑腔尺寸设计为  $2000\ \mu\text{m} \times 3000\ \mu\text{m}$ , LEH 为  $1000\ \mu\text{m}$ ,腔壁厚度为  $30\ \mu\text{m}$ .靶丸内径设计值为  $1000\ \mu\text{m}$ ,其内部为中空结构.靶丸壳层由四层组成,由外到内分别是铝、钨、铝和 CH 层,设计厚度分别为  $5\ \mu\text{m}$ 、 $2\ \mu\text{m}$ 、 $1\ \mu\text{m}$  和大于  $40\ \mu\text{m}$ (实际实验中达到  $70\ \mu\text{m}$ ),其作用分别是烧蚀层、阻挡层、反射膜层和冲击波传输层.阻挡层使用厚  $2\ \mu\text{m}$  的钨基本上可以阻挡住主激光对于 CH 层的致盲作用,内层铝的作用是为冲击波诊断提供一个初始的静态反射区域.

神光 III 原型八束激光分别从上、下两个方向相对腔轴线成  $45^\circ$  角方向注入腔内,激光焦点重合于注入孔中心.八路激光采用 CPP 束匀滑,注入孔平面焦斑尺寸设计为  $500\ \mu\text{m}$ .激光波长  $0.351\ \mu\text{m}$ ,脉冲宽度为  $3\ \text{ns}$  整形脉冲,激光脉冲每束能量为  $400\ \text{J}$ .

靶和诊断设备排布示意图 7 所示,靶位于真空靶室中央,为了便于说明在示意图中将靶尺寸放大.该实验的主要诊断设备为:1)成像型 VISAR 一套:测速范围  $\sim 20\ \text{km/s}$ ,使用厚  $7\ \text{mm}$  和  $10\ \text{mm}$  的标准具,视场范围  $< 0.5\ \text{mm}$ . 2)全能段 FXRD 一套:测量黑腔辐射流数据,辐射温度约  $50 \sim 150\ \text{eV}$ . 3)X 光针孔相机两台 (Up PHC、Down PHC):分别安装在靶室上、下半球,监测上、下激光注入情况. 4)透射弯晶谱仪一套 (Bent crystal Spectrometer):腔壁诊断孔处 Mo 膜特征辐射及黑腔韧致辐射.

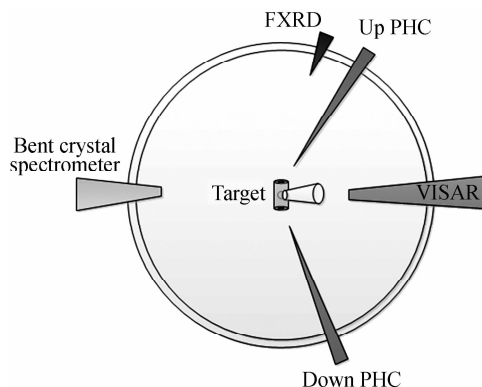


图 7 双轴 VISAR 实验诊断排布示意图

Fig. 7 Diagram of diagnostic arrangement for two-axis VISAR experiment

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验结果

实验中采用了八束激光上下注入,激光能量  $8 \times 400\ \text{J}$ ,脉宽  $3\ \text{ns}$ ,聚焦位置在入射孔,焦斑直径  $500\ \mu\text{m}$ .图 8 是实验前确认双轴测量位置所拍摄的照片(图 8(b))和条纹图( $20\ \text{ns}$  扫速档,图 8(a)).分析图 8(a)和图 8(b)后,可以看到对应的空间位置分别为:1)导光锥筒内壁;2)赤道方向诊断孔对应的靶丸反射区域;3)反射镜;4)极区诊断孔对应的靶丸反射区域;5)导光锥筒内壁.从图 8 可以看到,极区方向本应由反射镜反射探针光进入极区诊断孔进行观测,但由于靶丸尺寸过小的问题,故在装配时反射镜偏离了原来设计位置,没有完

全对准上极点,而由导光锥筒的斜坡把探针光反射到了上极点,所以在图 8(a)中的反射镜区域条纹是静止的.而相邻区域由于预热及冲击压缩等作用,条纹出现了很微弱的移动现象.

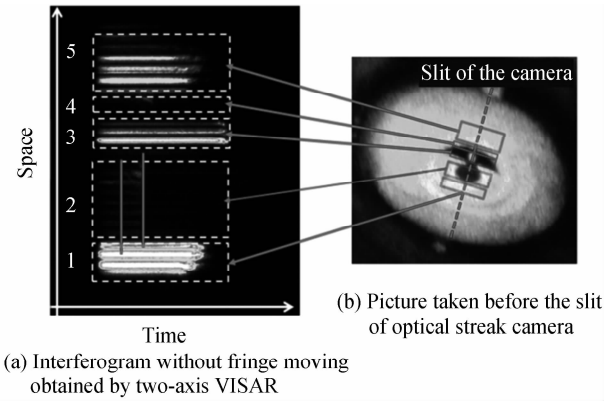


图 8 条纹图对应的空间位置

Fig. 8 Spatial location of interferogram

图 9 是 No. 37 发次双轴 VISAR 获得的条纹图像(扫速档为 10 ns).从 VISAR 图像结果来看,诊断设备基本上能看到两个方向的信号.不论从时间起点还是条纹形状上看,赤道和极点的条纹图出现了明显的不一致.极点的条纹图甚至出现了跳变.图 10 是对图 9 条纹图的处理结果.可以看到,极点的速度明显偏低,出现冲击信号的时刻也略微靠后,在后期还出现了一次明显的跳跃.这说明黑腔内的辐射场有一次再分配的过程.这个数据的趋势与理论模拟的表 1<sup>[15]</sup>的趋势是一致的.

本轮实验预计搭车验证的透射晶体谱仪没有采集到图像.分析原因是由于腔体大小很大,导致超热电子及韧致辐射很弱,没有达到设备的灵敏度.

表 1 对各种可作为反射镜材料的状态进行评估

Table 1 Property of materials which can be used as reflector			
Materials	$\Delta H_{vap}/k_{23}$	$1/k_{23}$	Reflectivity
Unit	J/cm <sup>2</sup>	$\mu\text{m}$	Ratio
Be	810	130	0.5
Al	7.99	2.7	0.85
Si	7.61	2.6	0.33
Au	0.824	0.26	0.9

### 3.2 分析与讨论

#### 3.2.1 反射镜的选择与靶型的设计

在该靶型设计中有两个关键的点需要把握,一个是反射镜材料的选择,一个是数据判读.根据文献的描述,在材料选择中主要需要考虑反射率和 X 射线吸收造成材料表面反射率下降所带来的矛盾.从设计的角度讲,反射率需要尽量高,易于加工,也就是文献[15]的  $H_{vap}/k_{23}/(1-R)$ ,表示对一种特定材料的 X 射线吸收与导致致盲之间综合评价的指标.  $H_{vap}$  表示单位体积吸收多少能量后会出现由金属到气体的相变,在本实验的安排中就是表现为反射镜失去反射率导致的致盲效应.  $k_{23}$  表示冷物质的不透明度,不透明度越小,吸收能力越差.  $1/k_{23}$  表示平均自由程,表示物质对 M 带 X 射线的吸收能力,数值越大,吸收能力越差.在表 1 中,Be 的吸收能力最差,从这个指标讲,最适合做反射镜.  $(1-R)$  表示静态冷物质时材料的吸收.  $H_{vap}/k_{23}$  的组合项表示在同样的 M 带预热条件下,材料更加不容易产生致盲效应.数值越大,越不容易产生致盲.

从表 1 看,Be 是一个比较好的材料.但是由于 Be 材料的加工和使用过程都会对人体产生很不好的影



图 9 双轴 VISAR 获得的有条纹移动的实验图像  
Fig. 9 Interferogram with fringe moving obtained by two-axis VISAR

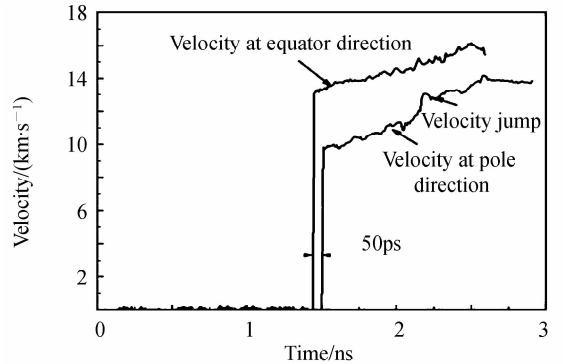


图 10 赤道和极点两个方向获得的冲击波速度  
Fig. 10 Shock velocity curve at equator and pole direction

响,所以实际使用中采用了 Al. 为了屏蔽腔内 X 射线对 Al 材料的预热导致材料的反射率变化. 一般还要在 Al 的后表面覆盖一层 Au 材料. 在该实验中,辐射温度很低,所以并没有选择 Al+Au 的组合方式,而是采用了 Al 反射镜的方式. 实验证明,效果也不错.

### 3.2.2 汇聚几何效应的影响

在双轴 VISAR 技术中,还有一个影响实验测量冗余度的重要特性是汇聚几何效应对测量对象和靶装配的要求. 在这次实验中最明显的影响就是只获得了最长 1.56 ns 的冲击波信号,而不是理论分析的 3 ns 左右.

在平面加载和二维加载的冲击波实验中,冲击波阵面通常呈现向外膨胀的分布,如图 11 所示. 从诊断设备光学条纹相机的狭缝记录条纹移动的角度看,而不是冲击加载的物理模型角度看,通常只需要考虑一个维度方向上的波阵面的变形,另一个维度基本上做等效处理. 本文双轴 VISAR 研究是基于激光间接驱动球形靶丸的基础上进行的,整个物理过程是球形压缩过程,球壳上的冲击波是向中心汇聚传输的<sup>[16]</sup>,所以,他们对冲击波阵面的二维尺度的影响就不能忽略了. 如图 12 所示,观测的一维方向上的冲击波速度变化是由球形压缩的三维效应产生的. 即使在采集的很小区域内,也可以分成 X、Y 两个方向的压缩过程,这是怎样解读三维压缩数据的问题.

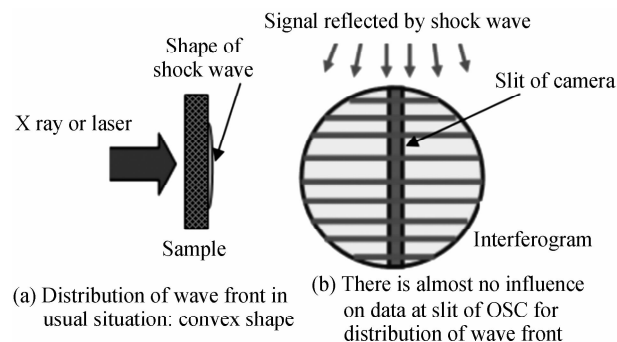


图 11 球形压缩下冲击波阵面分布对数据的影响  
Fig. 11 Influence on data for distribution of wave front in usual situation

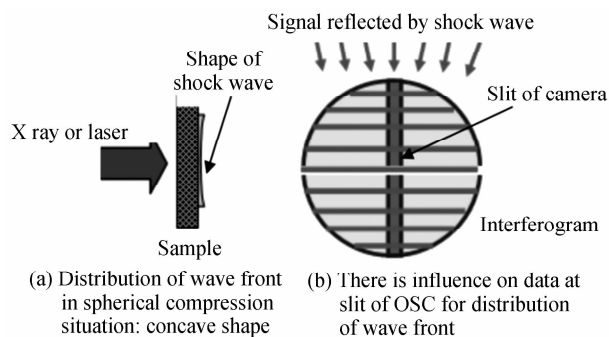


图 12 通常状态下冲击波阵面分布对数据的影响  
Fig. 12 Influence on data for distribution of wave front in spherical compression situation

从实验技术的角度讲,三维效应对诊断数据采集的皮实性带来了很大的影响. 在加载区域比较平整而且比较大的状态下,会采集到冲击波阵面比较平整的一段区域. 而由于实际靶丸和导光锥装配时总有一定的偏差,这个偏差就导致了实际能够测量的平整区域变小了. 所以,在这种影响下,对球形靶丸与导光锥的装配精度提出了更高的要求.

通过对实验结果的分析,可以认为极点部分的装配精度更好一些,在汇聚压缩效应影响到条纹相机采集的视场时,极点区域的信号消失的更晚一些. 而赤道区域的精度略差,汇聚效应开始不久,冲击波反射的信号就出了相机的视场了.

研究人员将综合驱动器和制靶的输入条件并结合模拟,解决目前暴露出的问题,包括:1)靶丸壳层内的铝反射率太弱,且靶丸曲率太大导致静态条纹计数偏低,严重影响了冲击波跳变位置的判断和速度的计算. 2)靶丸极区方向上可供观测的视场偏小,且容易在装配时偏离设计位置. 原因是靶丸内部的空间较小,不足以支持大反射镜的植入和冗余度较高的设计. 相应的改进措施是:1)变更靶丸极区方向反射镜的设计,可考虑直接将锥筒斜坡镀铝反射膜,增加反射区域面积,减小系统装配难度. 2)改进靶丸壳层内壁镀 Al 的工艺水平. 通过对理论分析的图 5 和实验获得的图 10 数据的分析,可以认为在现在辐射温度较低条件下,影响双轴 VISAR 实验数据获取与分析的主要因素应该是装配精度和汇聚效应的联合影响. 装配精度的影响更大一些.

由于美国 NIF 装置使用了液氙作为介质充满着靶丸,实际上更加符合冲击波调速实验的需求,而且可以观测到连续的冲击波加载和追赶信号,实验设计更加优秀,可以考虑将来在球形冷冻靶中应用双轴 VISAR 技术,以期实现点火物理设计中冲击波调速的实际需求.

## 4 结论

在神光Ⅲ原型装置上顺利完成了双轴 VISAR 诊断技术探索任务,达到了既定目标.物理实验验证了使用双轴 VISAR 靶的设计可以满足利用现有 VISAR 装置观测球形靶丸内不同方向冲击波的需求.通过理论模拟,首先对赤道和极点位置的辐射温度和冲击波速度进行预先估计,对可能出现的辐射温度场的再分配问题进行预先研究,有利于对后期实验数据的分析.由于实验中使用的腔和靶都比较大,实验中获得最高辐射温度为 100 eV,冲击波速度小于 20 km/s.而且,在极点还观察到了冲击波速度的跳变.这些经验都为下一步优化该实验技术提供了基础.

## 参考文献

- [1] ROBEY H F, BOEHLY T R, CELLIERS P M, *et al.* Shock timing experiments on the National Ignition Facility: initial results and comparison with simulation[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, **19**(4):339.
- [2] BOEHLY T R, VIANELLO E, MILLER J E, *et al.* Shock-timing experiments using double-pulse laser irradiation[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, **13**(056303):1-7.
- [3] LORENZ K T, EDWARDS M J, JANKOWSKI A F, *et al.* High pressure, quasi-isentropic compression experiments on the Omega laser[J]. *High Energy Density Physics*, 2006, **2**(3-4):113-125.
- [4] JIA G, XIONG J, DONG J Q, *et al.* Directly driven Rayleigh-Taylor instability of modulated CH targets[J]. *Chinese Physics B*, 2012, **21**(9):095202-1—095202-4.
- [5] HUANG Hai-jun, SHEN Qiang, LUO Guo-qiang, *et al.* Theoretical analysis of quasi-isentropic compression via flier-plate with grade wave impedance[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(03):1538-1542  
黄海军, 沈强, 罗国强, 等. 利用多层阻抗梯度飞片产生准等熵压缩的理论解析[J]. 物理学报, 2007, **56**(03):1538-1542.
- [6] LUAN Guang-bo, HAO Li, ZHANG Zhu, *et al.* Numerical study on the acceleration of metallic flyers driven by planar detonation wave of explosives[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2011, **25**(5):451-456.  
栾广博, 郝莉, 张柱, 等. 平面爆轰波驱动金属飞片运动的数值模拟研究[J]. 高压物理学报, 2011, **25**(5):451-456.
- [7] WANG Yong-gang, HE Hong-liang, *et al.* Numerical simulation of laser-driven dynamic tensile fracture in nanocrystalline copper[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(11):1623-1627.  
王永刚, 贺红亮, 等. 强激光辐照下纳米铜动态拉伸型断裂的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(11):1623-1627.
- [8] SMITH R F, EGGERT J H, JANKOWSKI A, *et al.* Stiff response of aluminum under ultrafast shockless compression to 110 GPa[J]. *Physical Review Letters*, 2007, **98**(065701):1-4.
- [9] HARLOW F H, AMSDEN A A. Fluid dynamics. a lasl monograph[M]. Los Alamos Scientific Laboratory Report 1971, No. LA-4700 085202-5.
- [10] LI W X. One-dimensional nonsteady flow and shock waves[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2003.  
李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [11] LANDEN O L, EDWARDS J, HAAN S W, *et al.* Capsule implosion optimization during the indirect-drive National Ignition Campaign[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, **18**(5):228.
- [12] WANG Feng, PENG Xiao-shi, LIU Shen-ye, *et al.* Direct measurement technique for shock wave velocity under super high pressure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(2):025202.  
王峰, 彭晓世, 刘慎业, 等. 超高压下冲击波速度直接测量技术[J]. 物理学报, 2011, **60**(2):025202.
- [13] WANG Feng, PENG Xiao-shi, LIU Shen-ye, *et al.* Shock experiment with sandwiched target in laser indirect-drive experiment[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(8):115203.  
王峰, 彭晓世, 刘慎业, 等. “三明治”靶型在间接驱动冲击波实验中的应用[J]. 物理学报, 2011, **60**(8):115203.
- [14] KIKENNY J D, BELL P M, BRADLEY D K, *et al.* The National Ignition Facility diagnostic set at the completion of the National Ignition Campaign[J]. *Fusion Science & Technology*, 2016, **69**(1).
- [15] MOODY J D, ROBEY H F, CELLIERS P M, *et al.* Early time implosion symmetry from two-axis shock-timing measurements on indirect drive NIF experiments[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, **21**(092702):1-12.
- [16] RYGG J R, JONES O S, FIELD J E, *et al.* 2D X-ray radiography of imploding capsules at the national ignition facility [J]. *Physical Review Letters*, 2014, **112**(195001):1-5.