

## 液氘状态方程实验数据测量

贾果 黄秀光<sup>†</sup> 谢志勇 叶君建 方智恒 舒桦 孟祥富  
周华珍 傅思祖

(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

(2014年11月16日收到; 2015年4月13日收到修改稿)

在神光II高功率激光装置上建立了液氘状态方程实验研究系统, 在80 min内实现控温范围12—300 K可调、控温精度 $\pm 0.03$  K、机械震动 $\leq 20$   $\mu\text{m}$ 的实验控制精度; 通过镀膜窗口质量筛选和靶体清洁工作解决了低温下窗口材料残余反射率高的难题, 获得了信噪比较好的实验图像; 利用神光II第九路输出 $3\omega$  (351 nm)、3 ns、1000 J的能力, 采用阻抗匹配方法, 配合任意反射面速度干涉仪诊断系统, 在国内首次获得液氘在约60 GPa压力下的冲击绝热线实验数据, 数据与国外同压力区间数据符合较好, 为下阶段约100 GPa压力范围液氘状态方程的实验研究奠定了基础.

关键词: 液氘, 状态方程, 冲击波, 信噪比

PACS: 64.30.Jk, 52.50.Lp

DOI: 10.7498/aps.64.166401

## 1 引言

惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)点火靶丸主要由聚苯乙烯、氘氚等低Z材料组成<sup>[1-3]</sup>, 它们的状态方程参数对点火靶丸参数设计、内爆压缩过程及效果、以及最终实现点火等至关重要, 实验研究它们的状态方程参数具有重大的学术和应用价值. 实验上常通过观察约100 GPa压力下的材料的压缩特性来研究这类问题, 特别是近几年来, 研究冲击条件下液氘的压缩比成为理论研究和实验研究进行比较的标准之一.

研究液氘状态方程数据的实验常利用气炮、激光、磁约束和爆炸聚轰的加载方式. 国外最早在1997年就利用激光对液氘的状态方程数据展开了实验研究<sup>[4]</sup>. Nellis等<sup>[5]</sup>利用气炮加载, 采用阻抗匹配方式实现了压强25 GPa的实验条件; 后来Collins等<sup>[6]</sup>在NOVA装置上利用激光加载方式, 配合时间分辨的X射线成像技术直接测量了冲击

波和粒子的速度, 实验结果表明在50—320 GPa的压力条件下, 液氘实现了5.5—6.0倍的高压缩比; 2009年Hicks等<sup>[7]</sup>利用OMEGA激光装置, 在100—220 GPa的压力条件下, 采用阻抗匹配的方式, 获得液氘最大压缩比达5倍的实验结果. 采用磁约束和爆炸聚轰的方式获得液氘的最大压缩比要小些, 2001年Knudson<sup>[8]</sup>利用磁约束飞片的方式获得液氘的最大压缩比约为4倍, 2003年Boriskov<sup>[9]</sup>利用爆炸聚轰的方式获得液氘最大压缩比约为4—4.5倍. 国内对液氘材料状态方程数据的研究起步较晚, 理论上已有部分研究发表<sup>[10]</sup>, 实验上尚处于研制液氘冷冻实验平台的阶段, 目前未有公开发表的实验数据. 本课题组于2012年启动了液氘状态方程数据的实验研究, 基本具备了开展液氘冷冻实验研究的条件和能力.

本文报道在神光II高功率激光装置上, 利用阻抗匹配方式, 在国内首次获得了液氘材料的状态方程实验数据, 并将初步获得的液氘状态方程数据与国外同压力区间的的数据进行了比对.

<sup>†</sup> 通信作者. E-mail: ottowham@163.com

## 2 实验原理

### 2.1 状态方程 (equation of state, EOS) 原理

EOS实验原理主要是通过 Rankine-Hugoniot 关系确定的, 基于冲击波在物质中传播时经过界面时波阵面上的动量、质量和能量守恒定律:

$$\begin{cases} P - P_0 = \rho_0(D - u_0)(u - u_0), \\ V = V_0[1 - (u - u_0)/(D - u_0)], \\ E - E_0 = \frac{1}{2}(P - P_0)(V_0 - V), \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\rho$ ,  $u$ ,  $D$ ,  $P$ ,  $V$  和  $E$  分别代表冲击波阵面后的密度、粒子速度、冲击波速度、冲击波压力、材料体积和比内能, 下标“0”表示相应的初始状态. 在常温和常压的实验条件下, 上述公式可简化为

$$P = \rho_0 D u, \quad (2)$$

$$\rho_0 D = \rho(D - u), \quad (3)$$

$$E - E_0 = \frac{1}{2} P (V_0 - V). \quad (4)$$

另外对于大多数凝聚介质,  $D-u$  在较宽的压力范围内具有线性关系:

$$D = C_0 + \lambda u, \quad (5)$$

其中  $C_0$ ,  $\lambda$  是常数, 由实验数据点  $(D, u)$  拟合得到. 而目前状态方程实验主要采用阻抗匹配的方式, 实验测量冲击波渡越已知厚度材料的时间来获得冲击波速度  $D$ , 因此, 根据 (2)—(5) 式即可得到相应压力范围内的冲击绝热线. 实验中测量得到冲击波速度  $D$  和计算得到粒子速度  $u$  后, 代入 (3) 式, 利用公式

$$\eta = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{D}{D - u}, \quad (6)$$

即可得到液氙经过冲击波压缩后的压缩比  $\eta$ .

### 2.2 温度与初始密度测量

由于液氙的初始密度是各种理论建模的输入条件且关系到状态方程参数的终态测量, 因此在液氙状态方程数据测量和比对的过程中, 需要给出液氙的初始密度. 目前, 液氙初始密度的测量主要有两种: 1) 利用激光在液氙中的透射吸收效应

反推液氙的饱和密度; 2) 测量液氙的温度, 利用饱和密度与温度的关系反推液氙密度. 本文采用第二种方式. 当液氙处于  $18.7 \text{ K} < T < 35 \text{ K}$  的温度范围时, 液氙的饱和密度满足以下半经验公式<sup>[11-15]</sup>:

$$\rho_0(T) = -0.005231T^3 + 0.3119T^2 - 8.225T + 252.9, \quad (7)$$

单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $T$  为液氙的温度, 本实验中液氙的初始密度  $\rho_0 = 0.170 \text{ g}/\text{cm}^3$ . 本课题组建立的液氙冷冻实验平台可以实现  $12-300 \text{ K}$  的低温环境, 可满足在  $80 \text{ min}$  内实现从常温到  $12 \text{ K}$ 、测温精度  $\pm 0.01 \text{ K}$ 、控温精度  $\pm 0.03 \text{ K}$  的实验要求.

## 3 实验条件

### 3.1 激光输入条件

实验在神光 II 装置上进行, 利用神光 II 装置第九路  $3\omega$  ( $351 \text{ nm}$ ) 激光, 采用直接驱动方式进行实验. 为保证激光驱动冲击波的平面性, 采用 LA 束匀滑技术<sup>[16]</sup> 对第九路激光进行空间匀滑, 靶面焦斑为矩形 ( $1000 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$ ); 为保证靶中冲击波的稳定性, 激光波形采用  $3 \text{ ns}$  梯形长脉冲. 利用任意反射面速度干涉仪 (velocity interferometer system for any reflector, VISAR) 诊断系统<sup>[17,18]</sup> 对冲击波速度进行主动诊断.

### 3.2 液氙实验用靶

液氙冷冻靶体为液氙状态方程实验研究中的重点部件, 其制作难点主要在于体积小、结构复杂、低温下密封要求高等. 如图 1 所示, 靶体主要由靶腔、激光入射窗口、信号窗口、待测材料层和输气孔组成.

激光入射窗口材料主体采用 Al (铝) 箔, 厚度约为几十微米, 直径约  $3 \text{ mm}$ . 信号窗口采用石英材质, 其前后表面镀探针光波段增透膜.

### 3.3 实验诊断与排布

如图 2 所示, 液氙状态方程实验研究诊断系统主要由探针激光器、光学收集系统、可见光条纹相机三部分组成, 按照信息收集方式又可分为主动式

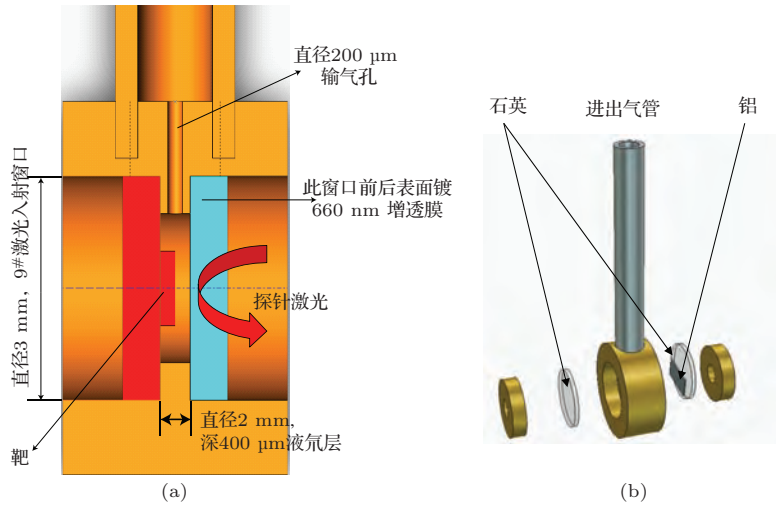


图1 (网刊彩色) 液氘靶体结构示意图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of liquid deuterium target.

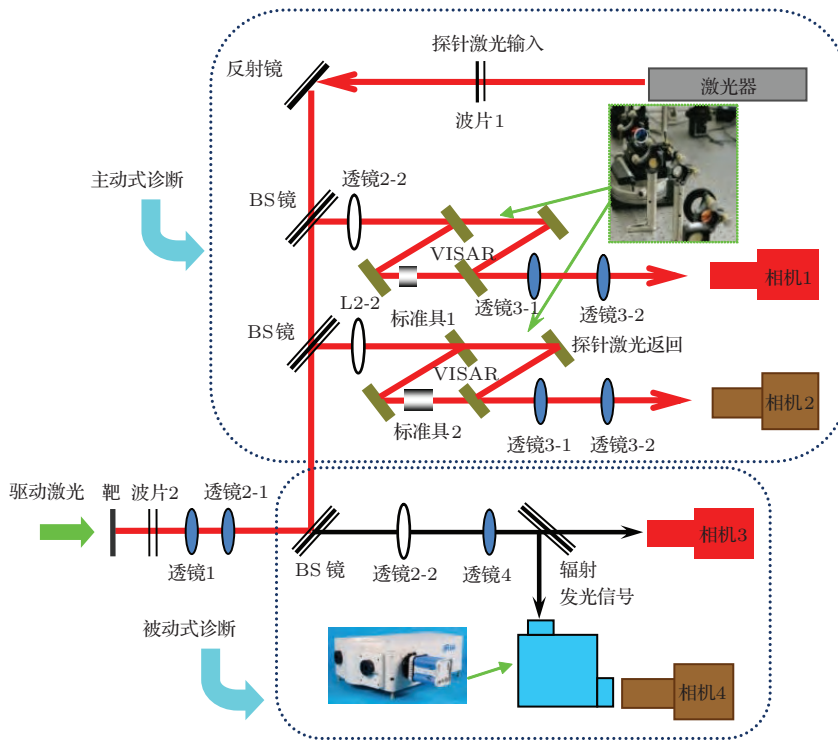


图2 (网刊彩色) 实验诊断系统示意图

Fig. 2. (color online) Schematic diagram of experimental diagnosis system.

测量系统和被动式测量系统。该系统具有  $7 \mu\text{m}$  空间分辨、最高时间分辨约几皮秒的诊断能力。主动式测量系统主要由两套干涉系统组成, 利用线VISAR技术对液氘中的冲击波信号进行测量, 通过解读干涉条纹的变化, 获得液氘中冲击波的速度变化信息, 这两套干涉系统配置不同长度的标准具, 用于反演计算干涉条纹的移动量<sup>[19]</sup>, 进而计算得到冲击波速度。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 实验图像和困难解决

图3为其中一发实验的记录图像。从图中可以看出, 冲击波脱出Al基底或Al台阶时, VISAR干涉条纹发生突变。在几十GPa压力下, 液氘变为类金属态, 波阵面具有较高的反射率。因此, 采用

VISAR系统可以记录冲击波阵面在液氘中的传播演化过程. 从图3中可以看出, 冲击波在液氘中传播整体呈现衰减趋势, 且存在多波追赶相互作用. 从图3的尾部可以看出, 干涉条纹在信号结束后依旧存在, 且计数较小. 经过分析, 这部分干涉条纹不是探针激光对冲击波波阵面的反射, 而是由于在低温情况下, 液氘实验用靶后窗口表面存在少量的“凝霜”物质, 造成探针激光在窗口表面存在一定的剩余反射率, 该反射率较高时, 严重影响了实验图像的对比度, 提高了数据处理的难度. 因此, 要获得较好的实验数据和较清晰的实验图像, 必须解决该问题.

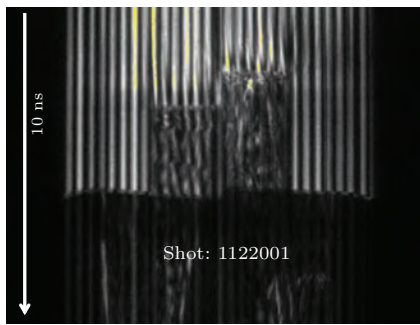


图3 (网刊彩色) 液氘实验图像

Fig. 3. (color online) Experimental image of the liquid deuterium.

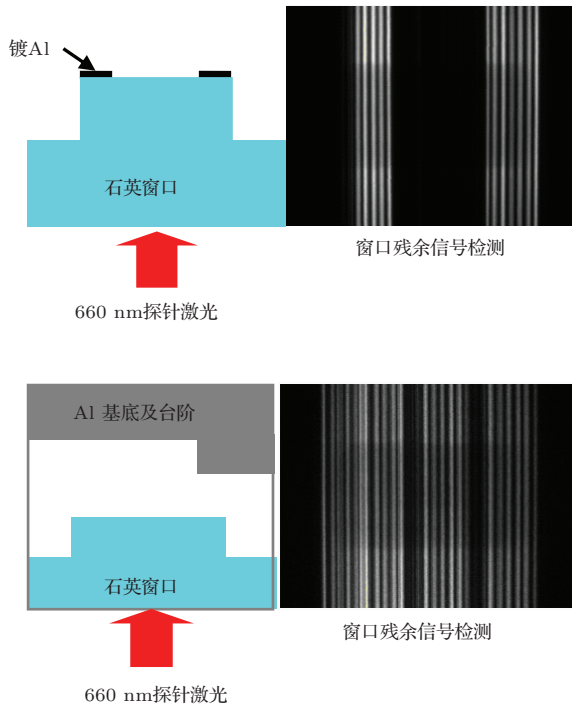


图4 (网刊彩色) 诊断窗口残余反射率标定

Fig. 4. (color online) Calibration of the residual reflectivity of the diagnosis window.

为解决上述问题, 主要从脏污清洁和透膜窗口质量的在线筛选两方面着手. 1) 通过禁用低温导热脂, 靶室、机械结构清洁和提高靶室真空度等方法降低脏污低温下在窗口上的凝霜; 2) 通过常温和低温下对窗口增透膜的在线标定, 选取增透效果较好的窗口, 如图4所示, 要求探针激光被窗口膜层返回的强度远远小于被Al膜返回的强度, 即可认为该镀膜窗口质量满足实验要求.

### 4.2 数据处理

利用条纹相机的数据处理程序, 可以获得冲击波在液氘台阶(或Al台阶)中的渡越时间, 根据实验前测量得到的液氘厚度(或Al台阶厚度)数据, 就可以计算得到冲击波在液氘(或Al)中传播的平均速度. 冲击波在液氘中的瞬时传播速度可以通过VISAR干涉条纹的移动变化获得, 其在液氘台阶

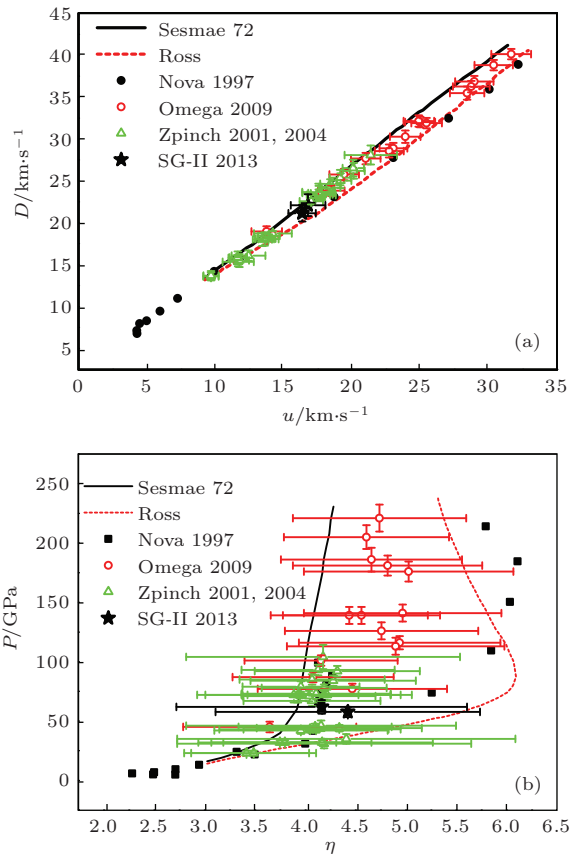


图5 (网刊彩色) (a) 冲击波速度与粒子速度关系曲线 ( $D-u$  线); (b) 冲击波压强与液氘压缩度关系曲线 ( $P-\eta$  线)

Fig. 5. (color online) (a) The curve of shock wave speed and particle velocity ( $D-u$  line); (b) the curve of shock wave pressure and liquid deuterium compression ( $P-\eta$  line).



范围内的冲击波速度平均值与上述冲击波平均速度几乎相同. 获得了冲击波分别在 Al 标准材料与液氙待测材料中的冲击波速度后, 根据阻抗匹配原理, 可以计算得到液氙的冲击波压强及粒子速度, 从而获得液氙材料的一个冲击绝热线数据点. 数据处理结果如图 5 所示, 我们获得了 2 发有效的实验数据, 液氙冲击波压强分别为 61.9 和 57.7 GPa. 从图 5 可以看出, 我们得到的数据与国外同压力区间数据符合得较好, 数据测量不确定度也与国外实验数据基本相当, 这是国内第一次获得液氙状态方程实验数据. 尽管实验设计还需进一步优化, 实验数据的不确定度还需进一步提高, 但这一研究结果已为后续的深入研究奠定了坚实的基础.

## 5 结 论

在神光 II 高功率激光装置上建立了液氙低温冷冻实验平台, 具备开展液氙状态方程实验研究的条件和能力. 利用第九路激光 ( $3\omega$ , 3 ns, 1200 J), 采用激光直接驱动方式和线 VISAR 诊断方式进行了液氙状态方程实验测量探索, 在国内首次获得了液氙的实验图像及状态方程数据, 液氙冲击波压强约 60 GPa, 与国外同压力区间数据符合得较好, 但由于诸多限制因素, 实验设计还需进一步优化, 下一步将着重围绕拓展压力区间和改善实验数据不确定度展开工作.

感谢神光 II 高功率激光装置运行组的大力协助.

## 参考文献

[1] Zhang W Y, Ye W H, Wu J F, *et al.* 2014 *Sci. Sin. Phys. Mech. Astron.* **1** 1 (in Chinese) [张维岩, 叶文华, 吴俊峰, 等 2014 中国科学: 物理学 力学 天文学 **1** 1]

[2] Haan S W, Lindl J D, Callahan D A, *et al.* 2011 *Phys. Plasma* **18** 051001

[3] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, Glendinning S G, Glenzer S H, Haan S W, Kauffman R L, Landen O L, Suter L J 2004 *Phys. Plasma* **11** 339

[4] Da Silva L B, Celliers P, Collins G W, Budil K S, Holmes N C, Barbee Jr T W, Hammel B A, Kilkenny J D, Wallace R J, Ross M, Cauble R, Ng A, Chiu G 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 483

[5] Nellis W J, Mitchell A C, van Thiel M, Devine G J, Trainor R J 1983 *J. Chem. Phys.* **79** 1480

[6] Collins G W, da Silva L B, Celliers P, Gold D M, Foord M E, Wallace R J, Weber S V, Budil K S, Cauble R 1998 *Science* **281** 1178

[7] Hicks D G, Boehly T R, Celliers P M, Eggert J H, Moon S J, Meyerhofer D D, Collins G W 2009 *Phys. Rev. B* **79** 014112

[8] Knudson M D, Hanson D L, Bailey J E, Hall C A, Asay J R, Deeney C 2004 *Phys. Rev. B* **69** 144209

[9] Boriskov G V, Bykov A I, Il'kaev R I, Selemir V D, Simakov G V, Trunin R F, Urlin V D, Shuikin A N, Nellis W J 2005 *Phys. Rev. B* **71** 092104

[10] Zhang Q L, Zhang G M, Zhao Y H, Liu H F 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 094702 (in Chinese) [张其黎, 张弓木, 赵艳红, 刘海风 2015 物理学报 **64** 094702]

[11] Goodwin R D, Diller D E, Roder H M, Weber L A 1961 *Cryogenics* **2** 81

[12] Rudenko N S, Slyusar V P 1969 *Russ. J. Phys. Chem.* **43** 434

[13] Clusius K, Bartholome E 1935 *Z. Phys. Chem.* **30B** 237

[14] Rudenko N S, Slyusar V P 1968 *Russ. J. Phys. Chem.* **42** 126

[15] Grilly E R, Amer J 1951 *Chem. Soc.* **73** 5307

[16] Deng X, Liang X, Chen Z, Yu W, Ma R 1986 *Appl. Opt.* **25** 377

[17] Peng Q X, Ma R C, Li Z R, Liu J, Liu Y K, Deng X Y, Chen G H, Wang R 2002 *Explosion and Shock Wave* **4** 211 (in Chinese) [彭其先, 马如超, 李泽仁, 刘俊, 刘元坤, 邓向阳, 陈光华, 王容 2002 爆炸与冲击 **4** 211]

[18] Li J, Zhou X M, Li J B, Wang X 2008 *Chin. J. High Press Phys.* **2** 020305 (in Chinese) [李俊, 周显明, 李加波, 王翔 2008 高压物理学报 **2** 020305]

[19] Qi W B, Yan Y D, Chen L Y, Y, He J H 2009 *J. Appl. Opt.* **30** 751 (in Chinese) [齐文博, 闫亚东, 陈良益, 何俊华 2009 应用光学 **30** 751]

# Experimental measurement of liquid deuterium equation of state data

Jia Guo Huang Xiu-Guang<sup>†</sup> Xie Zhi-Yong Ye Jun-Jian Fang Zhi-Heng Shu Hua  
Meng Xiang-Fu Zhou Hua-Zhen Fu Si-Zu

(Shanghai Institute of Laser Plasma, Shanghai 201800, China)

( Received 16 November 2014; revised manuscript received 13 April 2015 )

## Abstract

An experimental research platform is built on Shenguang II high power laser facility for obtaining the equation of state of liquid deuterium which has ability to control the temperature in a range of 12–300 K with an accuracy of  $\pm 0.03$  K in 80 min. By optimizing the coating processing and cleaning the target, we solve the problems that the residual reflection is too high and serious frosting takes place on the window of the target at low temperature, then we obtain the experimental image with a good signal-to-noise ratio. By using the impedance matching method and velocity interferometer system for any reflector, experimental Hugoniot data of liquid deuterium are obtained at a pressure of about 60 GPa under the output condition of  $3\omega$ , 3 ns, 1200 J on Shenguang II high power laser, which agrees well with the other published data in the same pressure regime and provides a good foundation for the next experimental study of liquid deuterium equation in 100 GPa pressure regime.

**Keywords:** liquid deuterium, equation of state, shock wave, signal-to-noise ratio

**PACS:** 64.30.Jk, 52.50.Lp

**DOI:** 10.7498/aps.64.166401

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [ottowham@163.com](mailto:ottowham@163.com)