

静-动加载相结合的材料状态方程实验平台的研制

舒桦 涂昱淳 王嵩越 贾果 叶君建 邓文 束海云 杨艳平 杜雪艳 谢志勇 贺芝宇 方智恒 华能  
黄秀光 裴文兵 傅思祖

Material equation of state by coupling static and dynamic loading

Shu Hua Tu Yu-Chun Wang Jun-Yue Jia Guo Ye Jun-Jian Deng Wen Shu Hai-Yun Yang  
Yan-Ping Du Xue-Yan Xie Zhi-Yong He Zhi-Yu Fang Zhi-Heng Hua Neng Huang Xiu-Guang Pei  
Wen-Bing Fu Si-Zu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 064101 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20172502

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20172502>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I6>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[通道靶对超强激光加速质子束的聚焦效应](#)

Focusing effect of channel target on ultra-intense laser-accelerated proton beam

物理学报.2017, 66(18): 184101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.184101>

[激光尾波场驱动准连续小角度电子束研究进展](#)

Generation of ultrafast broadband small angle hundreds MeV electron bunches from laser wakefield acceleration

物理学报.2017, 66(15): 154101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.154101>

[超强圆偏振激光直接加速产生超高能量电子束](#)

Ultrahigh-energy electron beam generated by ultra-intense circularly polarized laser pulses

物理学报.2015, 64(14): 144102 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.144102>

[电子在激光驻波场中运动产生的太赫兹及X射线辐射研究](#)

Motion-induced X-ray and terahertz radiation of electrons captured in laser standing wave

物理学报.2015, 64(12): 124104 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124104>

[强激光与锥型结构靶相互作用准直电子束粒子模拟研究](#)

Collimated electrons generated by intense laser pulse interaction with cone-structured targets using particle simulation

物理学报.2014, 63(9): 094101 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.094101>

# 静-动加载相结合的材料状态方程实验平台的研制\*

舒桦<sup>1)†</sup> 涂昱淳<sup>1)</sup> 王嵩越<sup>2)</sup> 贾果<sup>1)</sup> 叶君建<sup>1)</sup> 邓文<sup>2)</sup> 束海云<sup>2)</sup>  
 杨艳平<sup>2)</sup> 杜雪艳<sup>2)</sup> 谢志勇<sup>1)</sup> 贺芝宇<sup>1)</sup> 方智恒<sup>1)</sup> 华能<sup>3)</sup>  
 黄秀光<sup>1)</sup> 裴文兵<sup>1)</sup> 傅思祖<sup>1)</sup>

1)(上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

2)(北京高压科学研究中心, 北京 100094)

3)(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

(2017年11月22日收到; 2017年12月17日收到修改稿)

根据神光-II第九路高功率激光加载的特点, 对传统静高压金刚石压砧装置进行了改进和优化设计, 研制出了适合高功率激光加载条件下材料宽域状态方程研究的新静高压靶. 在神光-II高功率激光装置上建立了基于静高压金刚石压砧和动高压激光相结合的材料宽域状态方程研究平台. 利用这一平台开展了超纯水的宽域状态方程实验探索, 获得了较好的实验结果.

**关键词:** 静高压, 状态方程, 速度干涉仪

**PACS:** 41.75.Jv, 07.60.Ly

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172502

## 1 引言

材料在高压下的状态方程<sup>[1-6]</sup>对实验物理学、理论物理学、地球物理学、宇宙起源及其他一些分支学科的研究具有重要的意义. 目前理论上的物质宽域状态方程参数是由多模型多理论分区分段拼接得到, 特别是在过渡区, 不同模型的结果差异很大, 反映出人们对状态方程的认识不足, 仅依靠纯理论方法还无法获得高精度的材料宽区状态方程. 目前实验给出的冲击雨贡纽数据的状态范围太局限, 且误差较大, 不足以检验理论模型. 为此急需建立材料宽域状态方程实验研究能力.

采用静加载(如图1所示, 金刚石压砧, DAC)和动荷载(激光, Laser)相结合的方法<sup>[7-14]</sup>, 先用静加载改变材料的初始状态, 然后用高功率激光实施冲击加载, 可以获取材料在不同预压缩状态下的材料物态参数, 可以显著拓宽状态方程研究的温

度、密度区间, 可以实现材料在高密度状态下的物性探测, 填补全区域相空间上的数据空白, 确定材料的宽区状态方程, 实现若干材料物性的新发现, 会极大地促进行星体学和天文学的研究. 我国的相关技术和研究还处于基础阶段, 相关的科学研究几乎为空白.

本文主要介绍基于神光-II激光装置新发展的静-动加载相结合的实验技术, 该技术先用静高压装置预压缩样品, 然后用激光进行冲击加载, 对于低Z材料(如水、氢等)静加载压力范围可以从零点几个吉帕到2.5 GPa, 冲击加载压力可以从几十吉帕到500 GPa. 通过对传统静高压(DAC)装置进行改进和优化设计, 研制出了适合高功率激光加载条件下材料状态方程研究的新静高压装置. 采用静高压(DAC)和动高压(Laser)相结合的方式, 在神光-II高功率激光装置上建立了材料宽域状态方程研究平台. 利用这一平台开展了超纯水的宽域状态方程实验探索, 获得了超纯水在0.5 GPa预压缩状

\* 科学挑战专题(批准号: TZ2016001)和国家重点研发计划(批准号: 2017YFA0403200)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: shuhua1979@163.com

态下的雨贡钮数据, 并与不同理论计算结果进行了比较, 实验结果和基于量子分子动力学计算模型的计算结果符合得更好.

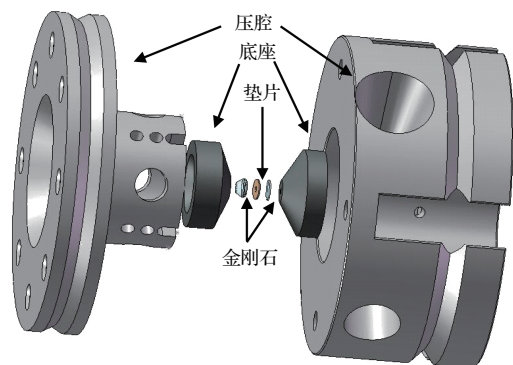


图1 静加载靶示意图

Fig. 1. Schematic diagram of static loading target.

## 2 靶物理设计

利用高功率激光驱动强冲击波开展材料高压状态方程研究已是一项比较成熟的技术. 阻抗匹配法<sup>[15,16]</sup>是强激光驱动冲击波获取材料状态参数的主要方法. 阻抗匹配方法要求冲击波满足平面性、稳定性和干净性等要求. 因此新型静加载(DAC)装置设计需要考虑这些因素.

脉冲宽度为纳秒量级的高功率激光驱动的冲击波的平面范围约300—800  $\mu\text{m}$ , 随着冲击波在介质中的传播, 冲击波强度逐渐衰减, 冲击波的平面范围会逐渐减小, 因此, 冲击波在介质中的传播距离不宜太远. 在静-动加载实验中, 静加载(DAC)装置中的DAC不仅是静高压装置的压力产生源, 同时也是动高压实验中冲击波的传播介质. 为了能在样品中获得尽可能高的动加载压力, 要求DAC的厚度尽量薄, 但是DAC厚度太薄会限制静加载压力. 因此, 需要对传统DAC进行优化和改进, 使其厚度既能满足激光动加载实验要求, 又能使静加载压力尽量高. 根据神光-II第九路激光产生冲击波的平面范围和冲击波在介质中的传播和衰减规律, 提出了相应的静加载靶物理设计方案, 具体的设计方案如图2所示.

图2从左到右依次是前碳化钨底座、25  $\mu\text{m}$ 厚度聚苯乙烯烧蚀层、2  $\mu\text{m}$ 厚的金预热阻挡层、前窗DAC、垫片、标准样品、待研究样品、后窗DAC、后碳化钨底座. 改进后的静加载(DAC)靶和传统

的静加载(DAC)靶相比有如下4点不同之处: 1) 前窗金刚石的厚度减薄到200  $\mu\text{m}$ 左右, 这样既能保证静加载压力, 又能保证冲击波经过前窗金刚石到达样品后仍然有较高的强度和一定的平面范围; 2) 前窗金刚石上增加了25  $\mu\text{m}$ 厚度聚苯乙烯烧蚀层和2  $\mu\text{m}$ 厚的金预热阻挡层; 3) 垫片的直径增加到800  $\mu\text{m}$ , 材料选择相对容易变形的铜; 4) 后窗金刚石双面镀上了针对660 nm激光的增透膜.

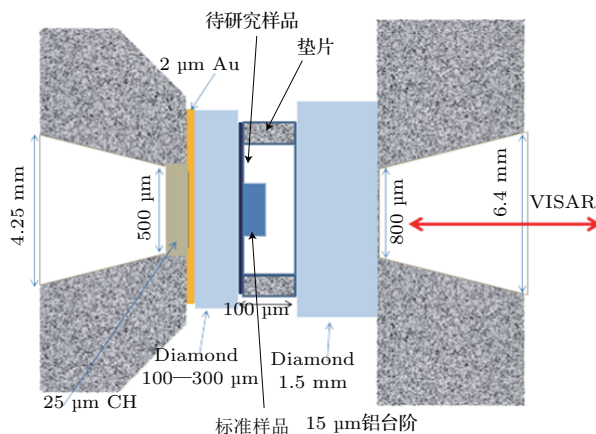


图2 改进的靶设计示意图

Fig. 2. Improved schematic diagram of target design.

## 3 靶制备

和传统静加载(DAC)装置相比, 改进后的静加载(DAC)装置不仅在金刚石尺寸上做了很大的改变, 而且增加了很多传统静加载(DAC)装置没有的新增要素. 这些改变极大地增加了这种改进型静加载(DAC)靶的装配难度. 为此, 我们制定了专门的装配流程. 先用胶将厚度25  $\mu\text{m}$ +15  $\mu\text{m}$ , 直径400  $\mu\text{m}$ 的铝台阶固定到前窗金刚石的中心, 对中的偏差小于50  $\mu\text{m}$ . 然后将前窗金刚石固定到前碳化钨底座上, 把垫片固定到前窗上, 放入红宝石压标和水样品, 最后将前后窗合上进行加压.

采用厚度为100  $\mu\text{m}$ 的前窗金刚石, 获得的最高初始静压为0.85 GPa. 样品的初始静压是通过红宝石荧光法进行测量的, 压力测量不确定度约0.03 GPa. 图3(a)给出了红宝石测压装置的实物照片, 图3(b)为其中一发靶的红宝石荧光谱<sup>[17]</sup>线测量结果. 其中蓝线表示没有加压时的红宝石荧光谱, 黑线表示第一次加压后的红宝石荧光谱, 红线表示再次加压后的红宝石荧光谱.

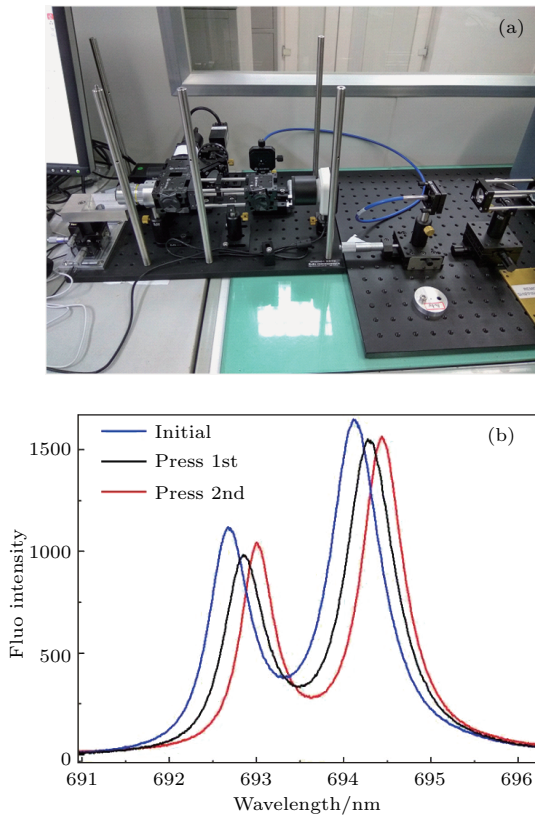


图3 (a) 红宝石荧光测压装置和 (b) 红宝石荧光谱线  
 Fig. 3. (a) Ruby fluorescence pressure measuring device and (b) ruby fluorescence line.

#### 4 实验结果与讨论

激光加载实验是在高功率激光联合实验室的神光-II装置上开展的, 实验采用直接驱动的打靶方式, 利用神光-II装置的第九路激光直接辐照靶, 在靶中产生强冲击. 为了实现靶面均匀照明, 采

用阵列透镜技术<sup>[18-20]</sup>对驱动激光进行空间束匀滑. 在靶面形成一个大小约为0.65 mm<sup>2</sup>均匀照明区域, 所形成冲击波的平面区域约为400 μm. 驱动激光的波长是0.527 μm, 驱动激光的脉冲波形为梯形方波(脉冲宽度3 ns), 激光在靶面的功率密度约0.5—2×10<sup>14</sup> W/cm<sup>2</sup>. 具体实验排布如图4所示.

实验的主要诊断设备是一套双灵敏度任意反射面速度干涉仪(VISAR)<sup>[21-23]</sup>和辐射高温计(SOP)<sup>[24]</sup>. 实验中冲击波的强度足以使水中的冲击波波阵面反射探针激光, 因此, 水中冲击波速度可以直接通过VISAR测量得到. 为了解决VISAR条纹丢失问题, 实验中采用两套不同速度灵敏的VISAR系统, VISAR的条纹常数分别是5.63和2.82 km/s.

实验采用阻抗匹配方法<sup>[15,16]</sup>研究超纯水的状态方程, 用铝作为标准材料, 因为铝的状态方程数据很多. 典型的实验结果如图5所示, 其中图5(a)是VISAR测量结果, 图像的竖直方向代表时间, 水平方向代表空间, 条纹移动代表冲击波速度的变化. 图5(b)是SOP测量结果.

水的初始静压约为0.5 GPa, 压力通过红宝石压标测量给出. 铝中的冲击波速度通过铝台阶厚度(实验前用白光干涉仪测量给出)和冲击波在铝台阶中的传播时间给出, 水中的冲击波速度通过VISAR测量. 实验上测量出标准材料(Al)和待测量(水)的冲击波速度后, 就可以通过阻抗匹配方法确定水的雨贡钮状态. 本轮实验一共打了3发, 实验

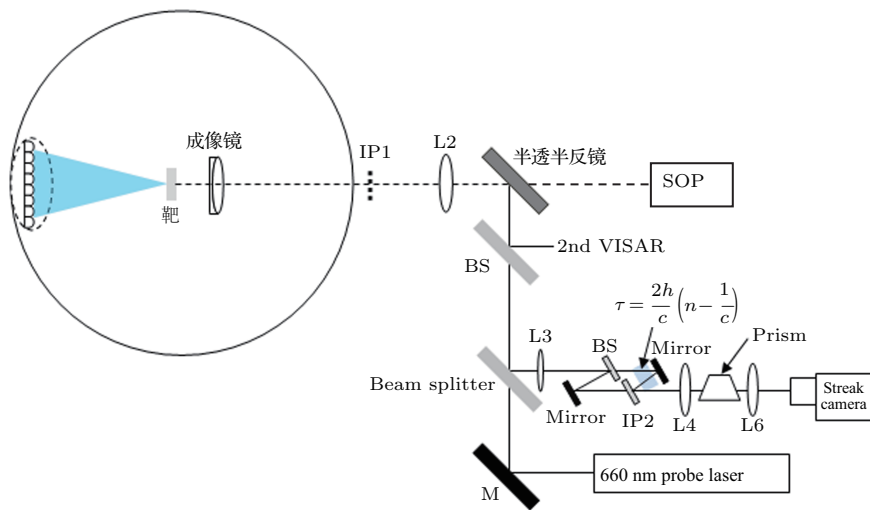


图4 实验排布照片

Fig. 4. Experimental arrangement photos.

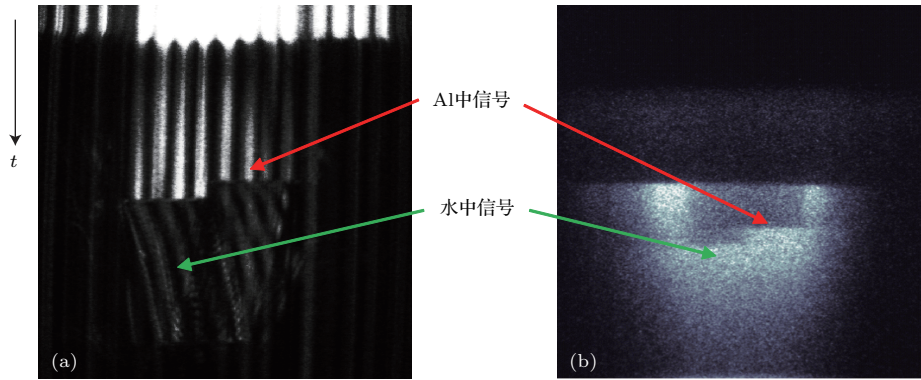


图5 典型的实验测量结果 (a) VISAR 测量结果; (b) SOP 测量结果  
Fig. 5. Typical experimental results measured by (a) VISAR and (b) SOP, respectively.

结果与基于 Sesame 模型和量子分子动力学计算的结果的比较如图 6 所示, 其中绿色点划线是基于量子分子动力学计算模型 (QMD)<sup>[13,25]</sup> 计算出的水在初始压力 0.5 GPa 下的雨贡钮数据, 红色点划线是基于 Sesame<sup>[9,13]</sup> 库计算出的水在初始压力 0.5 GPa 下的雨贡钮数据, 黑色点划线是基于 Sesame 库计算出的水在初始压力 1.0 GPa 下的雨贡钮数据. 可以看出实验结果和基于量子分子动力学计算模型的计算结果符合得更好. Sesame 模型是一种多组分、多相状态方程, 它采用线性混合假设考虑原子、分子解离、电离等过程. 量子分子动力学计算 (QMD) 是一种基于第一性原理的从头算法, 采用有限温度密度泛函理论计算电子结构性质相关信息, 可以描述化学键的断裂和重组, 或者电子的重排 (如化学反应). 在我们研究的压力-温度区间, Sesame 模型中用的线性混合假设可能已经不能真实地描述水的解离、电离等过程. 而量子分子动力学计算能比较真实地描述在该压力和温度范围中水的解离、电离等过程. 故实验结果更符合基于量子分子动力学计算模型的计算结果.

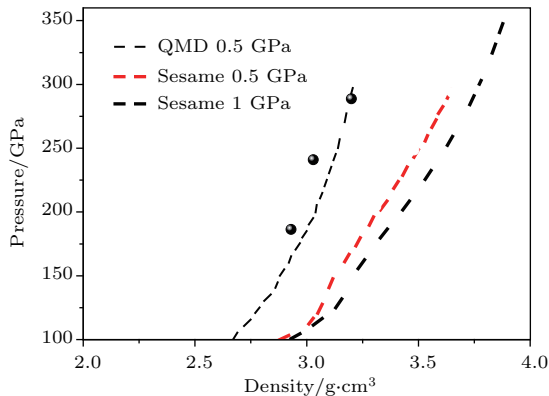


图6 压力-密度曲线

Fig. 6. Pressure density curves.

## 5 结 论

根据神光-II 第九路高功率激光加载的特点, 对传统静高压 (DAC) 装置进行了改进和优化设计, 研制出了适合高功率激光加载条件下材料状态方程研究的新型静高压装置. 根据新型静高压装置的特点, 制定了专门的装配流程, 逐步解决了前窗 DAC 和碳化钨底座连接固定问题、前窗金刚石和标准样品的连接固定问题、碳化钨底座中心和标准材料的对中等系列问题. 研制出了最高初始静压 0.85 GPa 的超纯水靶. 采用静高压 (DAC) 和动高压 (Laser) 相结合的方式, 进行了超纯水材料宽域状态方程研究探索实验, 获得了超纯水在 0.5 GPa 预压缩状态下的雨贡钮数据, 并和不同理论计算结果进行了比较, 实验数据和基于量子分子动力学计算模型的计算结果符合得更好.

## 参考文献

- [1] Benuzzi A, Löwer T, Koenig M, Faral B, Batani D, Beretta D, Danson C, Pepler D 1996 *Phys. Rev. E* **54** 2162
- [2] Batani D, Morelli A, Tomasini M, et al. 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 235502
- [3] Batani D, Strati F, Stabile H, et al. 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 065503
- [4] Boehly T R, Vianello E, Miller J E, Craxton R S, Collins T J B, Goncharov V N, Igumenshchev I V, Meyerhofer D D, Hicks D G, Celliers P M, Collins G W 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056303
- [5] Barrios M A, Hicks D G, Boehly T R, Fratanduono D E, Eggert J H, Celliers P M, Collins G W, Meyerhofer D D 2010 *Phys. Plasmas* **17** 056307
- [6] Sano T, Ozaki N, Sakaiya T, Shigemori K, Ikoma M, Kimura T, Miyanishi K, Endo T, Shiroshita A, Takahashi H, Jitsui T, Hori Y, Hironaka Y, Iwamoto A,

- Kadono T, Nakai M, Okuchi T, Ohtani K, Shimizu K, Kondo T, Kodama R, Mima K 2011 *Phys. Rev. B* **83** 054117
- [7] Jeanloz R, Celliers P M, Collins G W, Eggert J H, Lee K K M, McWilliams R S, Brygoo S, Loubeyre P 2007 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104** 9172
- [8] Loubeyre P, Celliers P M, Hicks D G, Henry E, Dawaele A, Pasley J, Eggert J, Koenig M, Occelli F, Lee K K M, et al. 2004 *High-Pressure Res.* **24** 25
- [9] Lee K K M, Benedetti L R, Jeanloz R, Celliers P M, Eggert J H, Hicks D G, Moon S J, Mackinnon A, Da Silva L B, Bradley D K, et al. 2006 *J. Chem. Phys.* **125** 014701
- [10] Eggert J, Brygoo S, Loubeyre P, McWilliams R S, Celliers P M, Hicks D G, Boehly T R, Jeanloz R, Collins G W 2008 *Phys. Rev. Lett.* **100** 124503
- [11] Celliers P M, Loubeyre P, Eggert J H, Brygoo S, McWilliams R S, Hicks D G, Boehly T R, Jeanloz R, Collins G W 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 184503
- [12] Loubeyre P, Brygoo S, Eggert J, Celliers P M, Spaulding D K, Rygg J R, Boehly T R, Collins G W, Jeanloz R 2012 *Phys. Rev. B* **86** 144115
- [13] Kimura T, Ozaki N, Sano T, Okuchi T, Sano T, Shimizu K, Miyanishi K, Terai T, Kakeshita T, Sakawa Y, Kodama R 2015 *J. Chem. Phys.* **142** 164504
- [14] Seagle C T, Reinhart W D, Lopez A J, Hickman R J, Thornhill T F 2016 *J. Appl. Phys.* **120** 125902
- [15] Knudson M D, Desjarlais M P 2009 *Phys. Rev. Lett.* **103** 225501
- [16] Hicks D G, Boehly T R, Celliers P M, Eggert J H, Vianello E, Meyerhofer D D, Collins G W 2005 *Phys. Plasmas* **12** 082702
- [17] Mao H K, Bell P M, Shaner J W, Steinberg D J 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 3276
- [18] Deng X M, Liang X C, Chen Z 1986 *Appl. Opt.* **25** 377
- [19] Fu S Z, Gu, Y, Wu J, Wang S J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3461
- [20] Shu H, Huang X G, Ye J J, Jia G, Wu J, Fu S Z 2017 *Laser Part. Beams* **35** 145
- [21] Shu H, Fu S Z, Huang X G, Ye J J, Zhou H Z, Xie Z Y, Long T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 114102 (in Chinese) [舒桦, 傅思祖, 黄秀光, 叶君建, 周华珍, 谢志勇, 龙滔 2012 物理学报 **61** 114102]
- [22] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, Hicks D G, Boehly T R, Armstrong W J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4916
- [23] Shu H, Fu S Z, Huang X G, Wu J, Zhou H Z, Ye J J 2012 *Meas. Sci. Technol.* **23** 015203
- [24] Miller J E, Boehly T R, Melchior A, Meyerhofer D D, Celliers P M, Eggert J H, Hicks D G, Sorce C M, Oertel J A, Emmel P M 2007 *Rev. Sci. Instrum.* **78** 034903
- [25] French M, Mattsson T R, Nettelmann N, Redmer R 2009 *Phys. Rev. B* **79** 054107

# Material equation of state by coupling static and dynamic loading\*

Shu Hua<sup>1)†</sup> Tu Yu-Chun<sup>1)</sup> Wang Jun-Yue<sup>2)</sup> Jia Guo<sup>1)</sup> Ye Jun-Jian<sup>1)</sup> Deng Wen<sup>2)</sup>  
 Shu Hai-Yun<sup>2)</sup> Yang Yan-Ping<sup>2)</sup> Du Xue-Yan<sup>2)</sup> Xie Zhi-Yong<sup>1)</sup> He Zhi-Yu<sup>1)</sup>  
 Fang Zhi-Heng<sup>1)</sup> Hua Neng<sup>3)</sup> Huang Xiu-Guang<sup>1)</sup> Pei Wen-Bing<sup>1)</sup> Fu Si-Zu<sup>1)</sup>

1) (Shanghai Institute of Laser Plasmas, Shanghai 201800, China)

2) (Center for High Pressure Science and Technology Advance Research, Beijing 100094, China)

3) (Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

( Received 22 November 2017; revised manuscript received 17 December 2017 )

## Abstract

Materials can be experimentally characterized up to terapascal pressures by sending a laser-induced shock wave through a sample that is pre-compressed inside a diamond-anvil cell. Pre-compression expands the ability to control the initial condition, allowing access to thermodynamic states from the principal Hugoniot and enter into the 10 TPa to 100 TPa (0.1–1 Gbar) pressure range that is relevant to planetary science. We demonstrate here a laser-driven shock wave in a water sample that is pre-compressed in a diamond anvil cell. The compression factors of the dynamic and static techniques are multiplied. This approach allows access to a family of Hugoniot curves which span the  $P$ - $T$  phase diagram of fluid water to high density. According to the loading characteristics of the SG-II high-power laser, the traditional diamond anvil cell is improved and optimized, and a new diamond anvil cell target adapting to high power laser loading is developed. In order to adapt to laser shock, the diamond window should be thin (100  $\mu\text{m}$ ) enough so that the shock can propagate to the sample before the side rarefaction erodes too much the shock planarity. With a thickness of 100  $\mu\text{m}$  over an aperture of 600  $\mu\text{m}$  diameter, a pre-compressed water sample at 0.5 GPa can be obtained. The water is pre-compressed to 0.5 GPa by using the diamond anvil cell. Hugoniot curve is partially followed starting from pre-compression at a pressure of 0.5 GPa. Pressure, density, and temperature data for pre-compressed water are obtained in a pressure range from 150 GPa to 350 GPa by using the laser-driven shock compression technique. Our  $P$ - $\rho$ - $T$  data totally agree with the results from the model based on quantum molecular dynamics calculations. These facts indicate that this water model can be used as the standard for modeling interior structures of Neptune, Uranus, and exoplanets in the liquid phase in the multi-Mbar range and should improve our understanding of these types of planets.

**Keywords:** diamond anvil cell, equation of state, velocity interferometer

**PACS:** 41.75.Jv, 07.60.Ly

**DOI:** 10.7498/aps.67.20172502

\* Project supported by the Science Challenge Project, China (Grant No. TZ2016001) and the National Key R&D Program of China (Grant No. 2017YFA0403200).

† Corresponding author. E-mail: [shuhua1979@163.com](mailto:shuhua1979@163.com)