

面向宽相区状态方程研究的 6.2 GPa 高压静-动加载实验技术*

马翎洋, 涂昱淳, 贺芝宇, 贾果, 方智恒, 王佩佩, 黄秀光

(中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800)

摘要: 材料在极端压力和温度条件下的状态方程是高能量密度物理、行星科学及惯性约束聚变研究中的重要基础数据。传统冲击压缩实验受限于样品初始状态, 通常只能覆盖有限的热力学相区; 而静态高压与激光动高压相结合的静-动加载技术能够通过改变材料初始密度显著拓展可研究的相区范围。本文发展了一种面向宽相区状态方程研究的高压静-动加载实验技术, 通过对 Mini-Boehler 型金刚石压砧 (DAC) 的靶结构进行力学与光学优化设计, 成功将静态预压水平提升至最高 6.2 GPa。实验依托神光 II 及神光 II 升级激光装置开展, 采用任意反射面速度干涉仪 (VISAR) 和条纹光学高温计 (SOP) 对冲击过程进行高精度诊断。同时针对高压实验条件, 对阻抗匹配法中的标准材料状态方程、折射率以及稀疏路径等进行了修正处理。实验结果表明, 该技术能够在保持良好诊断信号质量的同时显著提高样品初始密度, 从而拓展了冲击压缩实验可覆盖的热力学相区范围。以水、氘材料为案例验证, 该平台获得的实验数据与理论模型保持良好一致性。本文建立的高压静-动加载实验技术为开展材料宽相区状态方程研究提供了新的实验手段。

关键词: 冲击波; 状态方程; 金刚石压砧; 静-动加载; 温稠密物质

中图分类号: XXXX.X

文献标识码: A

引言

材料在极端压力和温度条件下的状态方程 (Equation of State, EOS) 是高能量密度物理、行星科学以及惯性约束聚变等领域不可或缺的核心物理量^[1-3]。在巨行星和类地行星内部, 物质常处于数十至数百 GPa、数千至数万 K 的极端环境中, 其物理性质与常态相比发生剧变。特别是在“温稠密物质” (Warm Dense Matter, WDM) 区域, 由于电子简并效应、强库仑相互作用与热运动能量处于同一量级, 传统凝聚态物理与等离子体物理理论均难以准确描述^[4-7]。因此, 获取可靠的宽相区 EOS 实验数据, 对优化行星模型及聚变靶设计意义重大。

目前, EOS 的实验研究主要依赖静态高压与动态压缩两大手段。静态压缩 (如金刚石压砧 (Diamond Anvil Cell, DAC)) 可实现数百 GPa 的持续高压^[8-11], 结合激光加热后也可达到数千 K^[12], 但难以进入更极端高温高压的温稠密相区; 动态压缩 (如轻气炮、磁驱动、激光驱动) 虽能在极短时间内产生远超静态实验的高温高压 (甚至达 TPa 量级^[13-15]), 但受限于常温常压的初始状态, 其冲击雨贡纽 (Hugoniot) 曲线往往局限于相图的高温低密区域, 难以覆盖温稠密物质区域以及高密度低温区域。

为拓展实验可覆盖的相区, 2004 年 Loubeyre 等人首次提出将静态预压与激光冲击相结合的静-动加载技术^[16], 该技术通过金刚石压砧预先提升样品的初始密度, 从而显著改变激光冲击产生的雨贡纽路径, 使实验状态点能够进入此前单一手段难以覆盖的热力学相区。随后, 静-动加载技术在氢、氦、水等行星物质的研究中得到广泛应用^[17]。代表性工作包括: 利用 2-2.5 GPa 初始预压下的水研究其超离子相^[18]; 在 0.16-1.6 GPa 预压区间内获得氢、氘的宽相区 EOS 数据^[19]; 以及在 4 GPa

*收稿日期: xxxx-xx-xx; 修回日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国防基础科研核科学挑战专题 (TZ2025013); 国家自然科学基金 (12304033)

作者简介: 马翎洋 (2000-), 男, 硕士在读, 主要从事极端条件下材料特性研究.E-mail: 15729531@qq.com

通讯作者: 贺芝宇 (1988-), 女, 博士, 副研究员, 主要从事凝聚态物理研究.E-mail: hezy1213@foxmail.com

预压条件下研究氢-氦体系的不相溶性，为理解气态巨行星内部结构及磁场起源提供了实验依据[20]。

然而，在实现较高预压水平的同时保持良好的动态诊断信号质量仍然存在一定技术挑战。特别是对于氢、氦等低原子序数（low-Z）材料，由于其光学性质和冲击响应特性，在高预压条件下容易出现诊断信号减弱以及冲击波传播衰减等问题。目前国际上报道的针对低 Z 材料的静-动加载实验中，静态预压水平通常在数 GPa 范围内，能够稳定获得高质量诊断信号的预压压力大多不超过约 4 GPa^[19,21]。因此，发展能够在更高预压条件下稳定开展实验的 DAC 靶结构和实验技术，对于拓展材料状态方程实验的研究范围具有重要意义。

前期，中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所联合北京高压科学研究中心逐步建立了基于高功率激光装置的静-动加载实验平台^[22]。早期工作主要聚焦于低预压（< 2.5 GPa）条件下的探索，通过对超纯水等体系的冲击声速及输运性质研究^[23,24]，初步验证了该技术在调控材料初始密度、拓展热力学探测路径方面的可行性。然而，受限于靶结构承压能力及高压下的信号劣化，前期实验的静态预压水平普遍处于 1 GPa 量级，尚无法触及更高初始密度下的物态区域。

为进一步提升平台的技术指标以满足宽相区状态方程研究的需求，本文针对低 Z 材料，如氢、氦、水等在高预压加载下靶结构易碎损的技术难题，对静-动加载靶结构进行了针对性设计。通过引入改进型 mini-Boehler 金刚石压砧并优化薄膜屏蔽工艺，在神光 II 系列装置上成功实现了最高 6.2 GPa 的稳定预压，并获得了高信噪比的速度干涉测量系统（Velocity Interferometer System for any Reflector, VISAR）与条纹光学高温测量系统（Streaked Optical Pyrometer, SOP）诊断数据。结合针对高初始压力修正的阻抗匹配分析方法，本文建立了一套完整的高预压静-动加载技术体系，显著拓展了冲击压缩实验的可探测相区，为极端条件下宽相区物态方程的精确测量奠定了坚实的技术基础。

1 高预压靶结构设计

静-动加载技术融合了 DAC 的静态预压与高功率激光的动态冲击优势，是拓展材料状态方程研究相区的核心手段。其典型实验流程为：首先利用 DAC 将样品预压至目标初始密度；随后以高功率激光辐照靶面烧蚀层驱动产生强冲击波，冲击波依次穿透前窗金刚石、标准材料与样品层；最终通过光学系统测量冲击波速度及自发光辐射强度，并结合阻抗匹配法推演样品的热力学状态。

在这一物理过程中，激光驱动侧的“前窗金刚石”兼具维持静态高压与传输动态冲击波的双重功能。为减弱冲击波在传输过程中的强度衰减并维持良好的波前平面度，以确保在样品区获取高信噪比的光学诊断信号，前窗金刚石的厚度需尽可能薄；然而，金刚石厚度的减小会显著削弱其力学强度，极大地限制了靶结构能够承受的最大静态预压水平。因此，我们在靶结构设计中需要在较高初始压力与良好动态信号质量之间进行优化权衡。针对上述问题，本文对靶结构进行了如下优化：

1.1 压砧构型改进

在纯静态 DAC 实验中，金刚石压砧的厚度通常在 1 mm 以上，配合微小砧面与高强度垫片，可轻松实现数百 GPa 的极高压力。然而，在静-动加载实验中，由于冲击波在介质中传播会发生快速衰减，驱动侧（前窗）金刚石的厚度通常被严格限制在 300 μm 量级以内，以确保样品能获得足够的冲击压力。这种厚度的大幅缩减直接导致压砧力学强度骤降，使得传统静-动加载实验的预压上限通常在 1~5 GPa 之间。

在早期的静动加载实验^[16]中，采用的是图 1 (a) 中的前窗平片式的金刚石压砧，其因应力集中导致预压承载能力极为有限，最高约 1.2 GPa。为实现更高预压并兼容激光驱动，本文采用了优化的 Mini-Boehler 型 DAC 结构（如图 1 (b) 所示）。该结构的核心改进在于：前窗金刚石采用几何圆锥体结构，通过减小砧面直径并增加侧向厚度，大幅提升了装置的承压极限；增大了驱动侧底座开角支持多路激光入射；砧座部分嵌入碳化钨支架内部，确保驱动激光能无遮挡地直接辐照金刚石表面，不仅避免了激光打在碳化钨上产生强 X 射线导致诊断设备“致盲”，也极大提高了实验成功率。

图 1 (c) 进一步给出了该构型 DAC 在加压后的样品腔区域显微内景, 可直观显示标准材料、垫片及样品区域的实际情况。

后窗金刚石主要用于维持样品的静态约束, 并作为冲击波透射后的观测窗口, 其结构设计主要关注横向尺寸与光学性能。相比前窗, 后窗金刚石厚度通常较大 (约 1-2 mm), 以保证良好的机械支撑和压力保持能力, 同时为光学诊断提供稳定的透射路径。此外, 为了实验中获得稳定的平面冲击波, 后窗金刚石同时需要具有足够大的横向尺寸以容纳直径为至少 200-300 μm 的平面区域, 在实际实验中, 当金刚石压砧的砧面直径约为 700 μm 时, 垫片在预压前可加工形成约 400 μm 直径的样品腔。在 DAC 加载过程中, 垫片孔径会因塑性变形而略微收缩, 但仍可容纳直径约 200-250 μm 的标准材料, 从而保证样品区域具有足够的横向尺寸以形成稳定的平面冲击波结构。

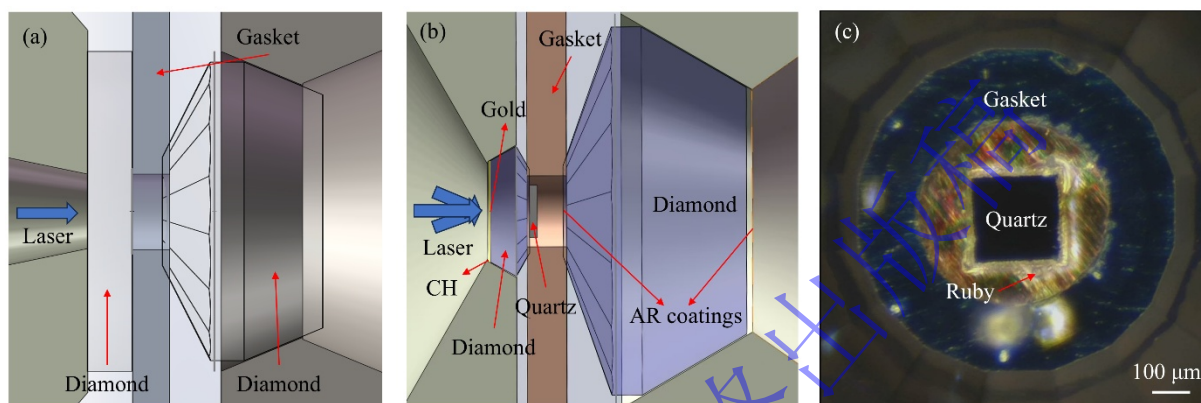


图 1 (a) 前窗平片式 DAC; (b) Mini-Boehler 型 DAC; (c) Mini-Boehler 型 DAC 加压后样品腔区域的显微内景图
Fig.1 (a) Conventional flat-anvil DAC; (b) Mini-Boehler type DAC; (c) Microscopic inner view of the sample chamber in Mini-Boehler type DAC

1.2 气体样品装配及初始状态标定

对于气体样品, 本文采用原位气体加压方式完成 DAC 靶的装配与密封。如图 2 所示, 装配系统主要由增压泵、高压腔和传动装置组成。制靶时, 先将标准材料和红宝石压标置于 DAC 样品腔内, 随后将其固定于齿轮盒并放入高压腔; 注入目标压力气体后, 利用外部传动系统旋转齿轮盒螺丝实现样品封装与预压。

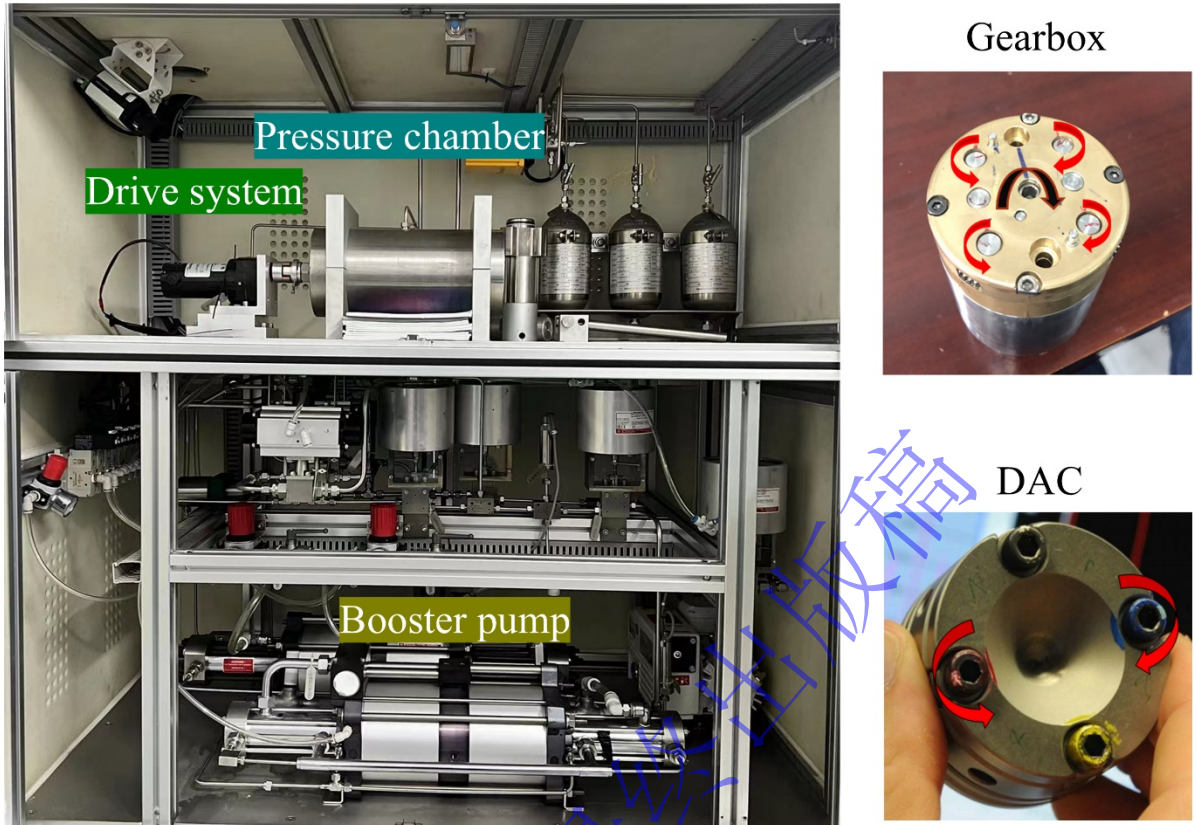


图 2 气体加压 DAC 靶装配与加压系统示意图

Fig.2 Schematic of the gas-loading DAC target assembly and pressurization system

静态预压压力通过红宝石荧光法^[25]光谱进行测量。实验中将微小红宝石颗粒置于样品腔内，测量其 R_1 荧光峰位置的红移来反推出压力值，压力不确定度为 ± 0.03 GPa。

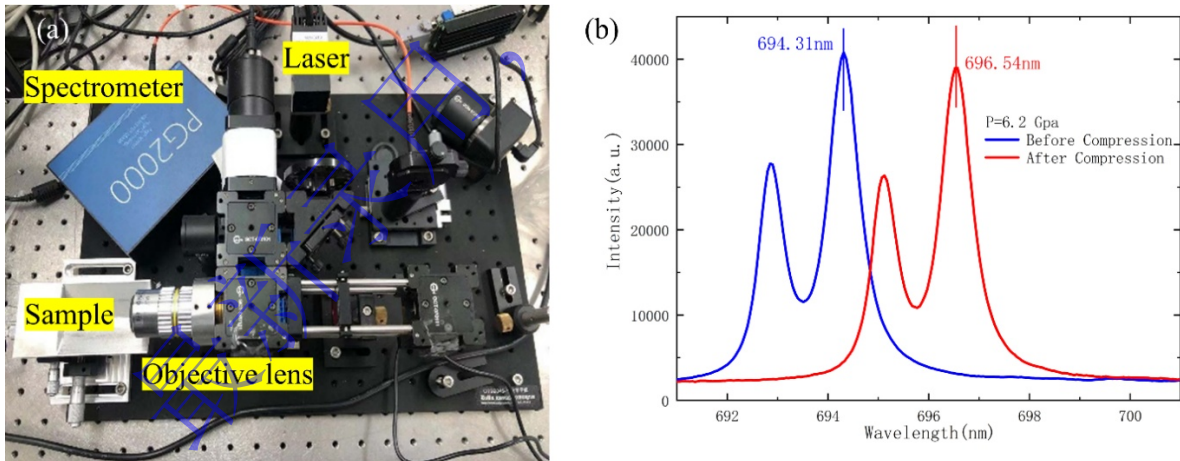


图 3 (a) 红宝石荧光标定装置；(b) 加压后的光谱谱线

Fig.3 (a) Ruby fluorescence pressure calibration system; (b) fluorescence lines after compression

1.3 膜层结构优化

为提高激光驱动效率并优化诊断信号质量，实验靶表面设计了多层功能薄膜结构，包括烧蚀层、吸收层以及光学功能膜，并适当加厚了金屏蔽层。如图 1 (b)所示，从激光入射方向开始，各层结构依次为：20-30 μm 聚苯乙烯烧蚀层，用于吸收激光能量并产生稳定冲击波；2-6 μm 金层用于吸收由激光产生的硬 X 射线和热电子，减少预热效应对样品初始状态的影响；250-350 μm 前窗金刚石；20-30 μm 石英标准材料；40-60 μm 样品层；1-2 mm 后窗金刚石，后窗金刚石表面镀有针对 VISAR

探针光（波长 540 nm 或 660 nm）的致密增透膜，以提高 VISAR 系统干涉信号的对比度和信噪比，从而提升测速精度。

1.4 标样及窗口材料

在阻抗匹配分析中，标准材料的选择至关重要。本实验选用 α -石英作为标准材料，而非传统的铝台阶标准材料，主要基于以下考虑： α -石英的 Hugoniot 关系及稀疏路径已被充分研究^[21,26,27]，具有较高的可靠性；石英在实验波段具有良好的光学透明性，且在约 90-100 GPa 压力段，会转变为导电流体，具有明显的反射率^[28-30]，适用于 VISAR 高精度测速；其冲击阻抗与多数轻元素样品（如水、氢、氘）更为接近，有利于降低阻抗失配带来的系统误差。在本实验中，石英标准层厚度通常选取为 20-30 μm ，以保证冲击波能够在其中达到稳定传播状态，同时避免过厚导致的信号衰减。

此外，在强激光驱动的超高压实验中，高能辐射诱导的自由载流子吸收极易导致光学窗口发生辐射致盲现象，破坏 VISAR 与 SOP 信号的连续获取。针对这一难题，本文系统开展了三种候选窗口材料的抗辐射性能对比研究。通过开展实际的强激光冲击加载实验并直接对比 VISAR 动态诊断信号，我们发现常规 I 型金刚石在冲击初期的强辐射场下迅速失效变暗，而蓝宝石与 II 型金刚石窗口均能维持优异的光学透过率稳定性，成功获取了连续的波前测速条纹，如图 4 所示。值得注意的是，尽管蓝宝石的抗辐射阈值略优于 II 型金刚石，但其断裂韧度较低，在金刚石压砧的高应力梯度加压过程中极易发生碎裂。即便通过增加蓝宝石压砧的厚度（通常需达 5 mm 以上）勉强维持约 5 GPa 的初始预压，这也会导致光学诊断路径过长，降低探针光的聚焦与收集效率，相较之下，金刚石窗口仅需 1~1.5 mm 厚度即可满足同等强度要求）。综合权衡抗辐射性能、力学承压极限与光学诊断需求，本平台最终优选 II 型金刚石作为高预压实验的标准观测窗口。

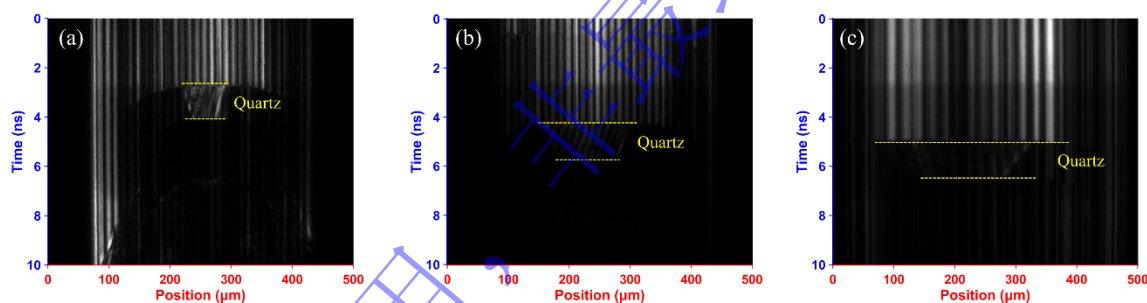


图 4 三种窗口抗辐射效应对比结果，(a) II 型金刚石窗口；(b) 蓝宝石窗口；(c) I 型金刚石窗口

Fig.4 Comparison of radiation effects in three window materials, (a) II-diamond window; (b) Sapphire window; (c) I-diamond window

2 激光驱动与动态诊断

2.1 激光冲击驱动与系统排布

宽域状态方程实验在神光 II 及神光 II 升级高功率激光装置^[31]上开展。实验采用单束或多束激光辐照靶面产生冲击加载。每束激光能量约为 1000-2000 J，脉宽为 1-3 ns，波长为 351 nm。为了获得均匀的冲击驱动条件，实验中采用透镜阵列或连续相位板^[32,33]对激光进行空间匀滑，在靶面形成面积约 0.2-0.5 cm^2 的均匀焦斑，激光强度约达 10^{14} W/cm^2 。

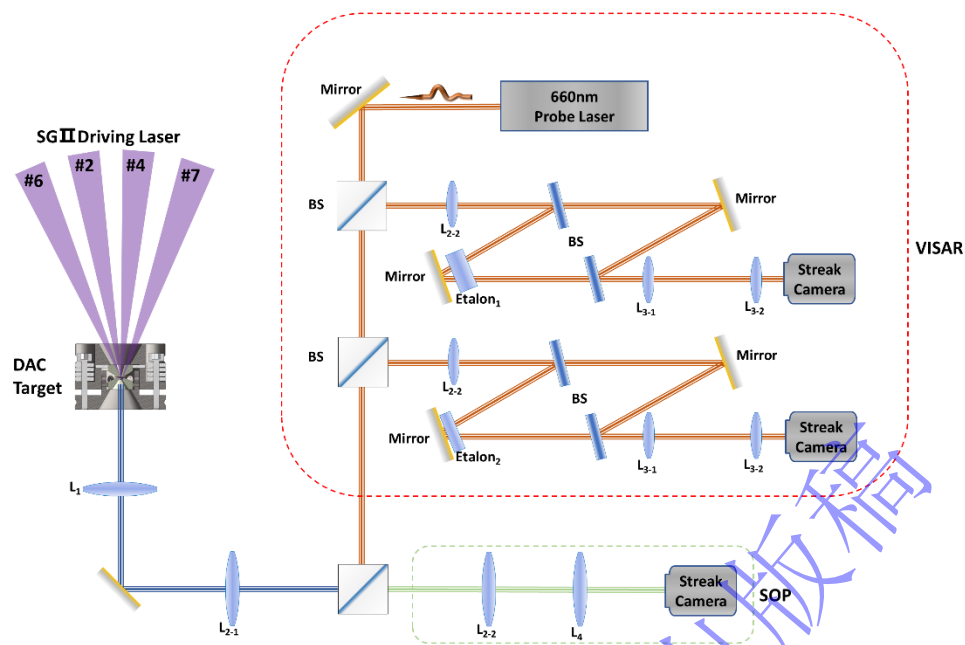


图5 实验排布及诊断示意图

Fig.5 Schematic of the experimental layout and diagnostics

基于 Rankine-Hugoniot 关系式的阻抗匹配分析，严格依赖于冲击波波阵面的一维平面性假设。在真实的动态压缩过程中，靶件边缘往往会向中心区域激发侧向稀疏波，导致冲击波阵面弯曲并破坏局部的高压平稳态。在传统的常压平面冲击实验中，靶件横向尺寸通常达毫米量级，足以通过几何宽容度规避侧向稀疏波对中心诊断区的干扰。然而，受限于 DAC 极限承压能力的制约，静-动加载靶的有效约束面积积极微小。在本文 6.2 GPa 的预压条件下，标准材料与样品的有效横向尺寸被压缩至 200~250 μm 范围内。

尽管受此极端微尺度边界条件的制约，得益于前窗金刚石厚度的薄化与驱动激光斑的高均匀度匹配，冲击波在靶内的纵向传输时间被大幅缩短。动力学演化表明，侧向稀疏波尚未有充足的时间侵蚀至靶面中心，样品中心轴线附近仍能维持一个直径达数十微米且具备极高平面度的一维冲击波稳态平台区。这一中心平坦区在空间与时间尺度上，完全满足了双通道 VISAR 探针光斑（直径约 50 μm ）的精确对准要求，从而确保了高压强冲击下连续、稳定且高信噪比的速度干涉信号的获取。

2.2 速度测量系统

实验采用双通道 VISAR 系统记录石英和样品中的冲击波速度，时间分辨率约 20 ps，空间分辨率约 7 μm 。两套 VISAR 系统通过选用不同厚度的延迟标准具引入不同的光学延迟，从而获得不同的速度灵敏度。由于 VISAR 测量到的相位信息具有 2π 周期性，通过采用不同灵敏度的双通道 VISAR 系统，可实现冲击波速度的唯一确定，同时兼顾测速范围与精度。

VISAR 系统相位测量的不确定度约为 ± 0.05 根条纹^[34]，该误差主要来源于散斑噪声、背景不均匀性及空间相位不连续性等系统性因素。在典型冲击实验条件下，冲击波传播通常对应多个条纹周期（一般大于 5 根条纹），使得冲击波速度的不确定度通常小于 1%。

VISAR 系统在透明介质中测量得到的是基于光程变化反演得到的表观速度，其本质上反映的是光在受压介质中的传播速度，而非材料的真实冲击波速度，而折射率修正是保证 VISAR 测速精度的关键步骤之一。

在冲击压缩过程中，材料密度显著增加，其折射率随之发生变化，从而影响光程和干涉条纹的位移。如果不考虑折射率的影响，将导致速度反演结果出现系统性偏差。因此需要对折射率进行修

正, 以获得真实的冲击波速度, 其关系为 $v_{\text{表现}} = nv_{\text{真实}}$, n 为材料在探针光波长处的折射率。材料的折射率通过特定的色散关系进行校正, 对于石英, 其在 VISAR 波长的折射率通过 Sellmeier 方程计算^[35], 如式 (1):

$$n_{o,e}^2 = A_{o,e} + \frac{B_{o,e}\lambda^2}{\lambda^2 - C_{o,e}} + \frac{D_{o,e}\lambda^2}{\lambda^2 - F_{o,e}} \quad (1)$$

对于寻常光轴, $A_o = 1.28604141$, $B_o = 1.07044083$, $C_o = 1.00585997$, $D_o = 1.10202242$, $F_o = 100$ 。

2.3 温度测量系统

实验中配备 442 nm 带通滤波器的条纹光学高温计^[36,37]记录冲击状态的自发光辐射。SOP 系统工作在线性响应区以避免发光假象。温度通过普朗克定律推导:

$$L(\lambda) = \frac{\varepsilon(\lambda)}{\lambda^5} \frac{2hc^2}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (2)$$

其中 h 是普朗克常数, c 是光速, k 是玻尔兹曼常数, λ 是 SOP 通道的波长, T 是物体的温度。发射率 $\varepsilon(\lambda)$ 由基尔霍夫定律给出:

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - t(\lambda) - R(\lambda) \quad (3)$$

透射率 $t(\lambda)$ 假设为零, 因为冲击波波阵面在光学上很厚。 R 是冲击波阵面的反射率, 样品的反射率可以通过已知的标准材料 (石英) 进行相对测量, I_Q 和 I_S 分别为石英和样品的波前探针光强度, f_T 为假设的光学系统传递函数, 于是有:

$$I_Q = I_P R_Q f_T \quad (4)$$

$$I_S = I_P R_S f_T \quad (5)$$

两式相除, 可以得到:

$$R_S = \frac{I_S}{I_Q} R_Q \quad (6)$$

以 α -石英为例, 由 Brygoo 等人^[21]的提出的分析框架可知, 冲击波反射率和冲击波温度关系为:

$$R(2.65, T) = \frac{0.11(\pm 0.03)}{1 + (16968(\pm 737)/T)^{3.64(\pm 0.51)}} T^{0.095(\pm 0.029)} \quad (7)$$

这里 2.65 表示 α -石英的标准初始密度为 2.65 g/cm³。反射率 R 与初始密度的 ρ_0 的关系为:

$$R(\rho_0) = R(2.65, T(\rho_0, U_S)) \quad (8)$$

冲击温度 T 可以由 α -石英的冲击波速度 U_S 得到:

$$T_{qz}(K) = 1860(\pm 190) + 3.56(\pm 0.52)U_S(km/s)^{3.036(\pm 0.046)} \quad (9)$$

在我们实验中, α -石英经过预压缩, 其初始密度 ρ_0 与压强 P 的关系为:

$$\rho_0 = 2.649(P_0(4.9/37.7) + 1)^{1/4.9} \quad (10)$$

因此, 温度 T 的关系式变为:

$$T(\rho_0, U_S) = T(2.65, U_S) - \beta(\rho_0 - 2.65) \quad (11)$$

$$\beta \pm 30\% = -14786 + 1555U_S \quad (12)$$

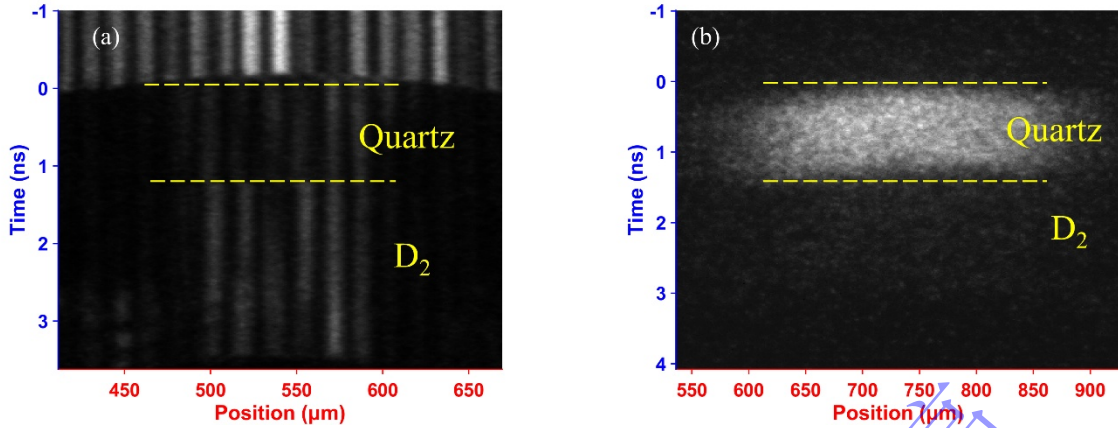


图 6 (a) VISAR 原始信号; (b) SOP 原始信号 (以冲击波进入石英时为 0 时刻)

Fig.6 (a) Raw images of VISAR; (b) Raw images of SOP (time zero is defined as the moment when the shock wave enters the quartz)

3 高压条件下的数据处理方法

在激光驱动冲击波实验中，阻抗匹配法^[38]是一种关键技术，用于确定样品在高压下的状态方程。当冲击波从标准参考材料（如石英或铝）传播到样品（如液态氙）界面时，由于两种材料的声阻抗（ ρU_S ）不同，会发生冲击波的反射与透射。具体而言，如果标准材料的阻抗高于样品（如石英的阻抗大于氙），冲击波从高阻抗介质进入低阻抗介质时，一个稀疏波（或等熵稀疏波）会向后传入标准材料中，以确保界面处的压力（ P ）和粒子速度（ u_p ）连续。这一过程遵循 Rankine-Hugoniot 守恒条件：

$$\begin{cases} \rho = \rho_0 \frac{U_S}{U_S - u_p} \\ P = \rho_0 U_S u_p + P_0 \\ e = e_0 + \frac{1}{2}(P + P_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) \end{cases} \quad (13)$$

实验中，通过测量标准材料的冲击速度（ U_S^Q ），可确定其 Hugoniot 状态（ P_1, u_{p1} ）。随后，样品的未知冲击状态（ P_2, u_{p2} ）通过阻抗匹配分析获得：样品的 Rayleigh 线（ $P = P_0 + \rho_0 U_S^S u_p^S$ ）与标准材料的等熵稀疏路径相交。这里我们使用铝/石英的有效 Grüneisen 常数 Γ_{eff} 模型计算（该模型经 Brygoo 等人验证适用于静动加载实验^[21]）而非简单使用镜像反演主 Hugoniot，以考虑熵增效应。图 7 展示了阻抗匹配法的细节，图中采用不同颜色的曲线代表关键物理路径：蓝色实线代表标准材料（如 α -石英）的 Rayleigh 线，其斜率由实验测量的冲击波速度（ U_S^Q ）和石英初始密度（ ρ_0^Q ）共同决定（即 $\rho_0^Q U_S^Q$ ）；紫色实线为预压下石英的 Hugoniot 曲线；绿色实线表示石英从冲击态等熵释放的路径，基于线性 Grüneisen 参模型计算；橙色实线则对应样品（氙）的 Rayleigh 线，斜率依赖于样品初始密度（ ρ_0^S ）和冲击波速度（ U_S^S ）。石英 Rayleigh 线与 Hugoniot 曲线的交点（ P_1, u_{p1} ）确定了石英在冲击波作用下的状态；石英等熵释放路径与样品 Rayleigh 线的交点（ P_2, u_{p2} ），确定了样品的冲击状态，其中虚线区间代表由实验测量、预压修正带来的误差带。实验误差包括随机误差和系统误差两类。随机误差主要来源于标准材料和样品冲击波速度的测量误差，以及初始预压压力确定所带来的初始密度误差；系统误差主要来源于标准材料状态方程、折射率修正以及解析稀疏路径模型等。上述不确定度通过蒙特卡洛方法进行传播：对各输入参数按照其误差范围进行随机采样，并重复进行阻抗匹配计算，最终获得样品压力和密度的不确定度范围。这一方法的不确定性主要来源于标准材料 EOS 和等熵稀疏线的系统误差，需通过蒙特卡洛方法传播。本轮实验中我们仅在少量低压实验发次中使用铝作为标准材料，铝密度变化在这样的压力下变化忽略不计，所以对于铝的发次我们仅使用铝稀疏线模型作为修正。大部分发次采用石英作为阻抗匹配标准材料，预压条件下石英的初始密度与常温常压下（ 2.65 g/cm^3 ）存在差异，其在预压下的 Hugoniot 行为对实验结果有

很大影响, 需进行修正。我们参考了 Brygoo 等^[21]的修正方法, 我们认为这个修正同样适用于我们的实验条件。

3.1 初始状态参数修正

α -石英的密度在预压后会显著增大, 必须引入关于初始压力的修正计算其冲击前的真实密度, 具体关系在式 10 中已经列出, 氙样品的初始密度由等温压缩线计算 (温度假设为 300 K)。

VISAR 系统测量冲击波速度与材料的折射率有关, 所以必须考虑材料在 VISAR 探针光波段下的折射率修正。对于标准材料石英, 折射率通过 Sellmeier 方程计算, 具体见式 (1), 对于氙样品的折射率计算参考文献中的数据^[39,40]。

3.2 解析稀疏路径模型

同样的, 实验数据的准确性也与阻抗匹配中标准材料的稀疏线相关。以石英为例, 一般使用主 Hugoniot 的镜像反演线代替, 这种方法虽然简便但误差很大, 特别在我们实验关心的高压段区域误差更大, 而使用准确的第一性原理分子动力学 (FPMD) 模拟方法十分繁琐且计算量巨大。

Knudson 等人提出的线性 Mie-Grüneisen 模型^[26]很好地解决了这两个痛点, 并且与 FPMD 模拟结果仅有 $\pm 1\%$ 以内的误差。需要指出的是, 该模型并非对稀疏波动力学过程的严格特征线求解, 而是一个基于 FPMD 模拟结果并经实验验证的解析近似模型。文献中明确指出, 该模型仅用于计算与阻抗匹配相关的运动学量, 尤其是用于构建 $P-u_p$ 平面中的稀疏路径, 而不能用于完整描述材料的热力学性质。线性 Mie-Grüneisen 模型在 300-1200 GPa 的范围内得到了验证, 并且 Brygoo 等人^[21]通过对比 DFT-MD 计算结果认为该模型同样适用于预压实验。后续 Desjarlais 等人^[27]收集到更多的 α -石英 Hugoniot 和稀释实验数据将模型拓展到较低压力区间, 同时利用第一性原理分子动力学

(FPMD) 计算将模型外推到较高的区间, 新的模型适用区间为 200-3000 GPa。在该模型中通过将 Mie-Grüneisen (MG) 模型中的 Γ 参数固定为常数, 同时以线性 U_s-u_p Hugoniot 响应作为 MG 模型的参考曲线, 该模型称为线性 MG (MGLR) 模型。MGLR 两个参数 Γ 和线性 U_s-u_p Hugoniot 的斜率 S , S 值被固定为 1.197, 因此 C_{01} 可以由冲击状态 (P_1, u_{p1}) 唯一确定, 值得注意的是, 在预压缩实验中, 我们需要考虑 P_0 。同样的, (P_1, u_{p1}) 由石英在预压下的 Hugoniot 确定。

$$C_{01} = \frac{P_1 - P_0}{\rho_0^0 u_{p1}} - S_1 u_{p1} \quad (14)$$

新模型唯一与旧模型不同的是, $S=1.197$ 时的 Γ_{eff} 更新为一个分段函数:

$$\Gamma_{\text{eff}} = \begin{cases} -1.4545 + 0.1102 U_s^Q \pm 0.036, & U_s^Q \leq 14.69 \\ 0.579(1 - \exp[-0.129(U_s^Q - 12.81)^{3/2}]) \pm 0.036, & U_s^Q > 14.69 \end{cases} \quad (15)$$

该模型的不确定度由 Monte Carlo 法传播, 我们认为新的模型同样适用于我们的预压缩实验条件。

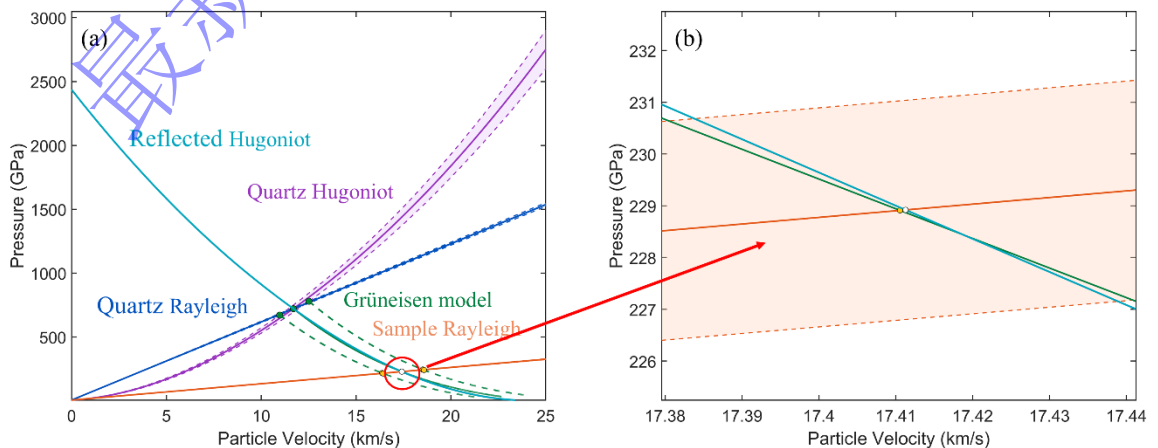


图7 阻抗匹配法示意图。绿色实线代表石英 Grüneisen 模型稀疏线，青色实线代表标准材料石英的镜像反演线，紫色实线代表石英的 Hugoniot 线，蓝色和橙色实线分别代表石英和样品的 Rayleigh 线。虚线区间为不确定度

Fig.7 Schematic of the impedance-matching method. The green solid line represents the release isentrope of quartz based on the Grüneisen model, and the cyan solid line denotes the mirror-reflected Hugoniot of the quartz standard. The purple solid line is the Hugoniot of quartz. The blue and orange solid lines correspond to the Rayleigh lines of quartz and the sample, respectively. The dashed region indicates the uncertainty.

4 实验结果与平台能力验证

为验证优化后平台的可靠性及数据处理模型的准确性，我们开展了从低预压水到高预压氘的系统性实验。首先，在水体系中实现了预压约 0.6 GPa，初始密度约 1.16 g/cm³ 的条件，获得了 186~342 GPa 范围的冲击状态数据。结合横向稀疏波前沿弯曲结构，我们成功提取了水在该状态下的声速。数据表明，实测声速与量子分子动力学 (QMD) 预测高度吻合，且通过冲击反射率分析有效提取了该状态下水的电子输运参数。这些低预压下的综合验证，证明了本平台在测速、测温及光学数据处理上的可靠性，为后续高预压实验确立了坚实的基线^[23,24]。

在此基础上，我们利用优化后的 Mini-Boehler 靶结构，将静-动加载实验成功拓展至预压高达 6.2 GPa 的氘低 Z 体系。与水相比，氘极高的可压缩性对靶的力学稳定性和光学透射率提出了更为严苛的要求。实验结果显示，在 6.2 GPa 的高预压下，激光冲击下的氘样品均获得了清晰、连续的 VISAR 纹带跳变信号与稳定的 SOP 热辐射信号，且未出现压砧破裂或信号“致盲”现象。这证明改进后的靶结构在高达 6.2 GPa 预压下依然具备优异的光学可诊断性。经过高预压修正后的阻抗匹配分析表明，获取的氘雨贡组数据点随初始密度的提高，冲击压缩路径发生了明显的轨迹偏移，实验状态点有效深入了更高密度、相对较低温度的热力学区域。需要特别说明的是，本文的核心主旨在于阐述高预压静-动加载实验技术的建立与诊断数据处理方法。因此，此处仅提取最高预压条件 (6.2 GPa) 下的一个极限发次作为代表性数据点，以验证平台的技术探测能力：该数据点的冲击压力约 228.91 GPa，密度约 1.63 g/cm³，温度约 14.81 kK，结合前文的蒙特卡洛误差传递方法，该状态点的压力不确定度约为±5.4%，密度不确定度约为±14%。数据与现有的 WEOS 理论模型^[15,41]保持了良好的一致性。关于本轮实验中获得的氘在不同预压条件下的系统性状态方程物理数据及深度理论分析，超出了本文的技术讨论范畴，将另文专门详述。上述极限状态点的成功获取，充分证明了改进后的靶结构在高达 6.2 GPa 预压下依然具备优异的力学支撑与光学可诊断性，显著拓展了单次动加载实验可覆盖的相图区域。

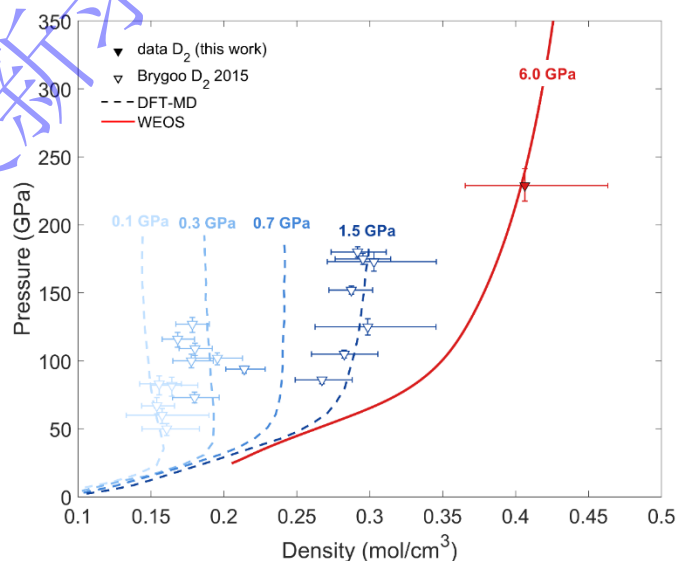


图 8 氘的压强与密度关系图, 空心倒三角为 Brygoo 等^[21]的低预压实验数据, 实心倒三角为本次实验高预压结果, 蓝色系虚线与红色实线分别为 DFT-MD^[42]和 WEOS^[15,41]的理论线

Fig. 8 Pressure–density relation of deuterium. Open inverted triangles denote the low-precompression experimental data from Brygoo *et al.*^[21], while solid inverted triangles represent the high-precompression results from this work. The blue dashed lines and red solid line denote the theoretical curves from DFT-MD^[42] and WEOS^[15,41], respectively.

5 结论

本文针对材料宽相区状态方程研究的需求, 发展并优化了高预压静-动加载实验平台。通过采用改进的 Mini-Boehler 型金刚石压砧结构并优化缓冲层与烧蚀层设计, 成功克服了低 Z 材料在高预压下诊断信号衰减的难题, 实现了最高达 6.2 GPa 的预压条件并结合针对高预压状态严格修正的阻抗匹配数据处理方法, 获得了高精度的氘冲击压缩状态方程数据。

本平台不仅将静动加载的预压上限从国际常见的约 4 GPa 稳定提升至 6.2 GPa, 且显著拓宽了单次动加载实验可覆盖的相图区域。该技术的建立为精准获取温稠密物质状态方程、深入理解行星内部演化机制及高能量密度物理提供了实验支撑。

致谢 感谢神光 II 装置运行组全体人员在激光打靶与设备运行调试中提供的鼎力协助。感谢北京应用物理与计算数学研究所刘海风、张其黎、李琼、宋海峰等老师在理论方面给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] SAUMON D, CHABRIER G, VAN HORN H M. An Equation of State for Low-Mass Stars and Giant Planets[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 1995, 99: 713.
- [2] HUBBARD W B, MILITZER B. A PRELIMINARY JUPITER MODEL[J]. The Astrophysical Journal, 2016, 820(1): 80.
- [3] HUBBARD W B. Interiors of the Giant Planets[J]. Science, 1981, 214(4517): 145-149.
- [4] MCMAHON J M, MORALES M A, PIERLEONI C, 等. The properties of hydrogen and helium under extreme conditions[J]. Reviews of Modern Physics, 2012, 84(4): 1607-1653.
- [5] AZADI S, FOULKES W M C. Fate of density functional theory in the study of high-pressure solid hydrogen[J]. Physical Review B, 2013, 88(1): 014115.
- [6] KNUDSON M D, DESJARLAIS M P. High-Precision Shock Wave Measurements of Deuterium: Evaluation of Exchange–Correlation Functionals at the Molecular-to-Atomic Transition[J]. Physical Review Letters, 2017, 118(3): 035501.
- [7] 刘海风, 张弓木, 张其黎, 等. 氢氘物态方程研究进展[J]. 高压物理学报, 2018, 32(5): 3-26.
- [8] GREGORYANZ E, GONCHAROV A F, MATSUIISHI K, 等. Raman Spectroscopy of Hot Dense Hydrogen[J]. Physical Review Letters, 2003, 90(17): 175701.
- [9] LOUBEYRE P, LETOULLEC R, HAUSERMANN D, 等. X-ray diffraction and equation of state of hydrogen at megabar pressures[J]. Nature, 1996, 383(6602): 702-704.
- [10] HEMLEY R J, MAO H kwang, GONCHAROV A F, 等. Synchrotron Infrared Spectroscopy to 0.15 eV of H₂ and D₂ at Megabar Pressures[J]. Physical Review Letters, 1996, 76(10): 1667-1670.
- [11] DATCHI F, LOUBEYRE P, LETOULLEC R. Extended and accurate determination of the melting curves of argon, helium, ice (H₂O), and hydrogen (H₂)[J]. Physical Review B, 2000, 61(10): 6535-6546.
- [12] DEEMYAD S, SILVERA I F. Melting Line of Hydrogen at High Pressures[J]. Physical Review Letters, 2008, 100(15): 155701.
- [13] KNUDSON M D, HANSON D L, BAILEY J E, 等. Principal Hugoniot, reverberating wave, and

- mechanical reshock measurements of liquid deuterium to 400 GPa using plate impact techniques[J]. *Physical Review B*, 2004, 69(14): 144209.
- [14] FERNANDEZ-PAÑELLA A. Shock Compression of Liquid Deuterium up to 1 TPa[J]. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, 2019.
- [15] HE Z, ZHANG Q, LIU H, 等. High-precision equation of state benchmark for cryogenic liquid deuterium at ultrahigh pressure[J]. *Physical Review B*, 2021, 103(13): 134107.
- [16] LOUBEYRE P, CELLIERS P M, HICKS D G, 等. Coupling static and dynamic compressions: first measurements in dense hydrogen[J]. *High Pressure Research*, 2004, 24(1): 25-31.
- [17] JEANLOZ R, CELLIERS P M, COLLINS G W, 等. Achieving high-density states through shock-wave loading of precompressed samples[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007, 104(22): 9172-9177.
- [18] MILLOT M, HAMEL S, RYGG J R, 等. Experimental evidence for superionic water ice using shock compression[J]. *Nature Physics*, 2018, 14(3): 297-302.
- [19] LOUBEYRE P, BRYGOO S, EGGERT J, 等. Extended data set for the equation of state of warm dense hydrogen isotopes[J]. *Physical Review B*, 2012, 86(14): 144115.
- [20] BRYGOO S, LOUBEYRE P, MILLOT M, 等. Evidence of hydrogen–helium immiscibility at Jupiter-interior conditions[J]. *Nature*, 2021, 593(7860): 517-521.
- [21] BRYGOO S, MILLOT M, LOUBEYRE P, 等. Analysis of laser shock experiments on precompressed samples using a quartz reference and application to warm dense hydrogen and helium[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118(19): 195901.
- [22] 舒桦, 涂昱淳, 王嵩越, 等. 静-动加载相结合的材料状态方程实验平台的研制[J]. *物理学报*, 2018, 67(6): 108-113.
- [23] SHU H, LI J, TU Y, 等. Measurement of the sound velocity of shock compressed water[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 6116.
- [24] LI J, SHU H, SUN Y, 等. Electronic bandgap of water in the superionic and plasma phases[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26(9): 092703.
- [25] CHERVIN J C, CANNY B, MANCINELLI M. Ruby-spheres as pressure gauge for optically transparent high pressure cells[J]. *High Pressure Research*, 2001, 21(6): 305-314.
- [26] KNUDSON M D, DESJARLAIS M P. Adiabatic release measurements in α -quartz between 300 and 1200 GPa: Characterization of α -quartz as a shock standard in the multimegabar regime[J]. *Physical Review B*, 2013, 88(18): 184107.
- [27] DESJARLAIS M P, KNUDSON M D, COCHRANE K R. Extension of the Hugoniot and analytical release model of α -quartz to 0.2–3 TPa[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(3): 035903.
- [28] HICKS D G, BOEHLY T R, CELLIERS P M, 等. Shock compression of quartz in the high-pressure fluid regime[J]. *Physics of Plasmas*, 2005, 12(8): 082702.
- [29] KNUDSON M D, DESJARLAIS M P. Shock Compression of Quartz to 1.6 TPa: Redefining a Pressure Standard[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(22): 225501.
- [30] HICKS D G, BOEHLY T R, EGGERT J H, 等. Dissociation of Liquid Silica at High Pressures and Temperatures[J]. *Physical Review Letters*, 2006, 97(2): 025502.
- [31] 朱健强, 李学春, 朱俭, 等. 神光 II 综合实验平台[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(11): 1101001-1101001-19.
- [32] DENG X, LIANG X, CHEN Z, 等. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Applied Optics*, 1986, 25(3): 377.
- [33] LI F, GAO Y, ZHAO X, 等. Experiment and theory of beam smoothing using induced spatial incoherence with a lens array[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(10): 2976.

- [34] CELLIERS P M, BRADLEY D K, COLLINS G W, 等. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the OMEGA laser facility[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(11): 4916-4929.
- [35] GHOSH G. Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals[J]. Optics Communications, 1999, 163(1-3): 95-102.
- [36] HE Z Y, SHU H, HUANG X G, 等. Shock temperature and reflectivity of precompressed H₂ O up to 350 GPa: Approaching the interior of planets[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(12): 126202.
- [37] GREGOR M C, BONI R, SORCE A, 等. Absolute calibration of the OMEGA streaked optical pyrometer for temperature measurements of compressed materials[J]. Rev. Sci. Instrum., 2016.
- [38] DUVAL G E, GRAHAM R A. Phase transitions under shock-wave loading[J]. Reviews of Modern Physics, 1977, 49(3): 523-579.
- [39] DEWAELE A, EGGERT J, LOUBEYRE P, 等. Measurement of refractive index and equation of state in dense He, H₂, H₂O, Ne under high pressure in a diamond-anvil cell[J]. Physical Review B, 2003, 67(9): 094112.
- [40] BRODY E M, SHIMIZU H, MAO H K, 等. Acoustic velocity and refractive index of fluid hydrogen and deuterium at high pressures[J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(5): 3583-3585.
- [41] 刘海风, 李琼, 张其黎, 等. 氢及氘的宽区物态方程研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2021, 33(1): 81-91.
- [42] CAILLABET L, MAZEVET S, LOUBEYRE P. Multiphase equation of state of hydrogen from *ab initio* calculations in the range 0.2 to 5 g/cc up to 10 eV[J]. Physical Review B, 2011, 83(9): 094101.

Development of a 6.2 GPa Precompressed Static–Dynamic Compression

Technique for Wide-Range Equation-of-State Investigations

MA Xuyang, TU Yuchun, HE Zhiyu, JIA Guo, FANG Zhiheng, WANG Peipei,
HUANG Xiuguang

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

Abstract: The equation of state of materials under extreme pressure and temperature conditions is important fundamental data in high energy density physics, planetary science, and inertial confinement fusion research. Traditional shock compression experiments are limited by the initial state of the sample and can usually only cover a limited thermodynamic region; in contrast, the static–dynamic compression technique combining static high pressure and laser-driven dynamic compression can significantly extend the accessible thermodynamic region by changing the initial density of the material. In this work, a high-precompression static–dynamic compression experimental technique for equation-of-state studies over a wide thermodynamic range is developed. By mechanically and optically optimizing the target structure of a mini-Boehler-type diamond anvil cell (DAC), the static precompression level is successfully increased to as high as 6.2 GPa. The experiments are carried out on the SG-II and SG-II upgrade laser facilities, and velocity interferometry (VISAR) and a streaked optical pyrometer (SOP) are employed for high-precision diagnostics of the shock process. Meanwhile, under high-precompression conditions, corrections are applied to the standard material equation of state, refractive index, and release path in the impedance-matching method. The experimental results show that this technique can significantly increase the initial density of the sample while maintaining good diagnostic signal quality, thereby extending the thermodynamic region accessible by shock compression experiments. Using hydrogen and deuterium as representative materials, the experimental data obtained from this platform show good agreement with theoretical models. The high-precompression static–dynamic compression experimental technique established in this work provides a new experimental

approach for equation-of-state studies over a wide thermodynamic range.

Keywords: Shock waves; Equation of state; Diamond anvil cell; Static-dynamic compression; Warm dense matter

最新录用，非最终出版稿