



“天光一号”驱动的聚苯乙烯高压状态方程测量

田宝贤 王钊 胡凤明 高智星 班晓娜 李静

Equation-of-state measurements for polystyrene under high pressure driven by HEAVEN-I laser facility

Tian Bao-Xian Wang Zhao Hu Feng-Ming Gao Zhi-Xing Ban Xiao-Na Li Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 196401 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210240

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210240>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于神光III原型装置开展的激光直接驱动准等熵压缩研究进展

Progress of laser-driven quasi-isentropic compression study performed on SHENGUANG III prototype laser facility

物理学报. 2018, 67(4): 045202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172159>

静-动加载相结合的材料状态方程实验平台的研制

Material equation of state by coupling static and dynamic loading

物理学报. 2018, 67(6): 064101 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172502>

高温等离子体的状态方程及其热力学性质

Equations of state and thermodynamic properties of hot plasma

物理学报. 2017, 66(3): 030505 <https://doi.org/10.7498/aps.66.030505>

聚龙一号装置磁驱动准等熵压缩实验的一维磁流体力学模拟

One-dimensional magneto-hydrodynamic simulation of the magnetic drive isentropic compression experiments on primary test stand

物理学报. 2018, 67(3): 030702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171920>

同位旋非对称强作用物质状态方程及热力学性质

Equation of state and thermodynamic properties of isospin imbalanced strongly interacting matter

物理学报. 2021, 70(14): 145101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210132>

温稠密物质物态方程的理论研究

Theoretical study of the equation of state for warm dense matter

物理学报. 2017, 66(3): 036401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.036401>

“天光一号”驱动的聚苯乙烯高压状态方程测量*

田宝贤[†] 王钊 胡凤明 高智星 班晓娜 李静

(中国原子能科学研究院核物理研究所, 北京 102413)

(2021年2月1日收到; 2021年6月1日收到修改稿)

聚苯乙烯等 CH 材料的高压状态方程研究对于 ICF 聚变点火具有重要意义. 本文基于“天光一号”长脉冲激光装置开展了聚苯乙烯高压状态方程研究, 理论模拟了靶内的冲击动力学过程, 采用侧向阴影成像技术实验测量了不同厚度的聚苯乙烯平面靶和飞片靶, 获得了靶内的冲击波速度与粒子速度等状态方程参数. 结果表明: 长脉冲激光驱动下 CH 平面靶内经历了明显的准等熵加载过程, 并逐渐演化为弱冲击加载. 实验测量平面靶压力 12 GPa, 飞片撞击靶压力 34 GPa, 与模拟结果基本相符.

关键词: 准等熵压缩, 侧向阴影, 状态方程, 冲击波速度, 粒子速度

PACS: 64.30.Jk, 52.35.Tc, 52.57.-z, 52.50.Lp

DOI: 10.7498/aps.70.20210240

1 引言

低密度 CH 材料是激光惯性约束聚变^[1-4] (inertial confinement fusion, ICF) 靶丸壳层的常用材料之一. 作为烧蚀层, CH 材料直接参与激光与等离子体相互作用以及内爆压缩过程, 对聚变内爆动力学以及不稳定性过程具有重要影响. 因此, 开展聚苯乙烯等 CH 材料的高压状态方程研究, 对于 ICF 聚变靶设计与内爆物理实验具有重要意义.

目前, 国内外主要采用轻气炮、激光驱动等方式开展 CH 材料的高压状态方程研究. 其中, 激光驱动是利用激光烧蚀驱动冲击波实现材料的动高压加载, 具有加载应变率高、时空尺度小、非接触式等特点, 已经成为动高压加载研究的主要手段之一. 美国 Barrios 等^[5,6] 在 OMEGA 激光装置上采用激光速度干涉仪 (velocity interferometer system for any reflector, VISAR) 与阻抗匹配法实验测量了标准样品 α -石英与 CH 双层靶的冲击加载过程, 获得了 1—12 Mbar (1 Mbar = 10^{11} Pa) 下聚苯乙

烯、聚乙烯、GDP($\text{CH}_{1.3}\text{O}_{0.02}$, NIF 点火靶丸壳层材料) 等材料的状态方程. Aglitskiy 等^[7] 在 NIKE 激光装置上采用 X 射线照相技术测量了 2—9 Mbar 冲击加载下 CH 泡沫的状态方程. 国内黄秀光等^[8] 和舒桦等^[9] 在神光 II 装置上采用 VISAR、冲击发光等方法开展了聚乙烯、聚苯乙烯的高压物态方程测量, 冲击压力达到 7 Mbar. 研究表明: 在 ICF 点火设计中, 冲击加载会导致较高的温升和熵增, 过早地形成强冲击会增大后期主脉冲的压缩难度, 影响点火内爆过程. 因此, 国内外相继开展了激光驱动准等熵加载技术^[10] 研究, 通过脉冲整形与束靶耦合延缓冲击波的形成, 实现靶内连续缓慢的准等熵加载. 美国 NIF 装置通过脉冲整形在金刚石材料中实现了 5 TPa 的准等熵加载^[11]. 国内神光 III 原型采用脉冲整形技术在 Al 材料中实现了 500 GPa 的准等熵加载^[12]. “天光一号”利用其 20 ns 长上升沿的特点, 不经脉冲整形在 Al 靶内实现了 18 GPa 的准等熵加载^[13,14]. 目前, 准等熵加载技术在 CH 材料高压状态方程研究方面尚未广泛应用, 实现准等熵加载的束靶耦合条件、靶内动力学演化过程等

* 国家财政部稳定支持研究经费 (批准号: WDJC-2019-02, BJ20002501) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: tianbaoxian@163.com

关键物理问题有待深入研究.

此外, VISAR 诊断技术在高压物态方程、准等熵加载中应用非常广泛, 但 CH 材料、 α -石英等常压透明材料在 1 Mbar 以下准等熵加载或者弱冲击加载下无法满足冲击不透明条件, 导致波阵面无法反射探测光; X 光侧向阴影技术可以获得烧蚀面、波阵面的运动过程, 但实验条件相对苛刻. 因此, 针对 CH 材料的准等熵加载测量技术尚需进一步探索.

本文基于中国原子能科学研究院“天光一号”激光装置^[15], 开展了长脉冲激光加载下聚苯乙烯 CH 材料的高压状态方程研究, 理论模拟了不同靶结构参数下的准等熵加载与弱冲击加载动力学过程, 利用可见光侧向阴影成像技术^[16,17]实验测量了平面靶、飞片撞击靶的冲击波渡越平均速度、自由面速度等参数. 结果表明: CH 平面靶 (单层 CH、双层 Al + CH 两种) 经历了明显的准等熵加载过程, 并导致了冲击波末态速度与渡越平均速度的明显差异.

2 实验方案

本实验基于“天光一号”激光装置, 采用可见光侧向阴影成像技术开展聚苯乙烯材料的高压状态方程测量, 实验布局与原理示意图如图 1 所示. “天光一号”六束激光聚焦辐照平面薄膜靶, 并通过内调焦望远镜系统进行束靶定位; Verdi 激光器发出的 532 nm 探测光经柱面镜压缩横向通过靶的中心对称轴; 探测光被靶遮挡形成阴影信号, 经放大成像系统 (4—6 倍) 进入条纹相机; 当靶飞行时阴影发生移动并被条纹相机记录, 从而获得靶背自由面速度、渡越平均速度等关键参数.

辐照激光“天光一号”是电子束泵浦的 KrF 准分子激光, 波长 248 nm, 六束聚焦激光能量可达 100 J; 激光波形与光斑光强分布如图 2 所示, 波形为类高斯型, 脉冲宽度 28 ns, 光斑平顶直径 500 μm , 能量集中度约为 50%, 功率密度可达 $10^{12}\text{W}/\text{cm}^2$, 光束均匀性好于 2%, 可以实现一维平面冲击加载、准等熵加载等多种加载方式.

图 3 为 CH 靶的三种靶结构: 纯 CH 平面靶, 厚度为 100—200 μm ; 镀膜 CH 靶, 50—150 μm 厚的 CH 层上镀有 5 或 10 μm 的 Al 膜; 飞片撞击靶, 包含镀膜 CH 飞片层、100 μm 空腔层、50—100 μm

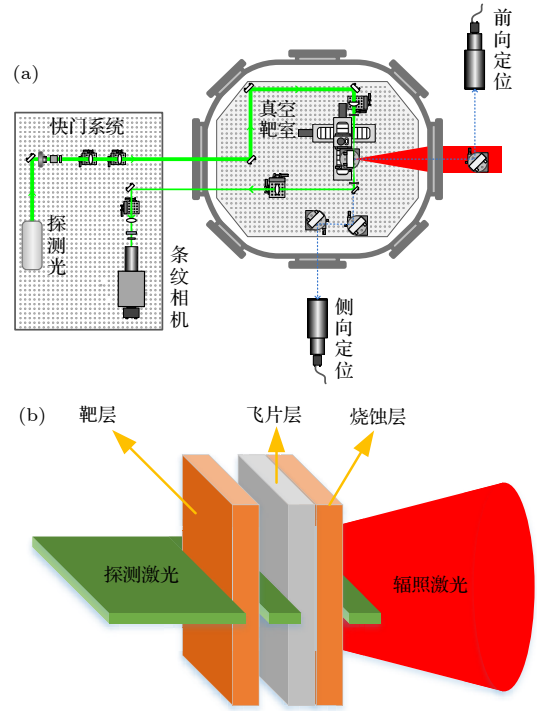


图 1 CH 材料状态方程侧向阴影 (a) 实验布局; (b) 原理示意图

Fig. 1. CH EOS side-on shadow experiments: (a) experimental layout; (b) schematics.

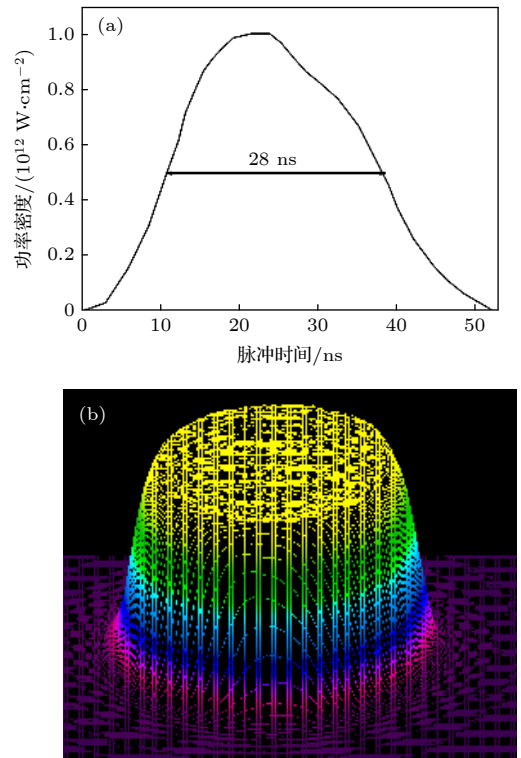


图 2 (a) “天光一号”的典型脉冲时间波形; (b) 六束聚焦叠加光斑的空间分布

Fig. 2. (a) Heaven-I laser pulse shape; (b) spatial profile of six-beam focusing spot.

的 CH 目标靶三层结构. 实验中, 纯 CH 平面靶通常选择 100 μm 以上厚靶, 降低前表面烧蚀、电离以及预热对靶主体的影响. 镀膜 CH 靶以 Al 层作为烧蚀层, 可以减弱直穿光、X 射线预热对 CH 层的影响. 飞片撞击靶结构中, CH 层厚度较大, 侧向剪切、稀疏等二维效应明显, 不适合作为飞片撞击层, 实验选择 Al 层撞击 CH 目标靶. 为确保制靶与装配过程中靶的平面性, CH 目标靶厚度不易太薄.

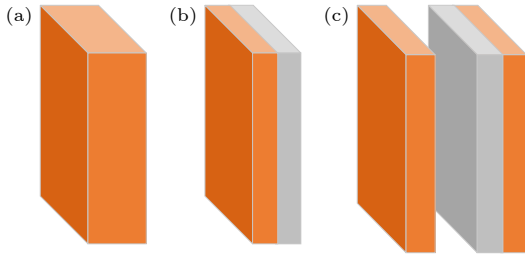


图 3 CH 靶结构示意图 (a) 纯 CH 平面靶; (b) 镀膜 CH 靶; (c) 飞片撞击靶
 Fig. 3. Structure schematics of CH targets: (a) Planar CH target without Al foil; (b) planar CH target with Al foil; (c) flyer-impact target.

3 数值模拟

为研究长脉冲激光加载的冲击动力学过程、优化靶耦合实验参数设计, 采用 HYADES 程序模拟了“天光一号”不同束靶条件下的冲击波演化过程. 该程序是一个一维、三温的辐射流体力学程序, 以流体力学方程为核心, 将激光、辐射沉积、热能传输等视为“源项”, 在模拟激光驱动冲击波物理过程、流体力学物理图像等方面是极为适用的^[18,19]. 模拟程序输入主要包括激光、靶结构、靶材料、空间网格、时间步长等参数, 如表 1 所列. 其中, CH 材料采用 Sesame EOS_32 数据, 平均原子序数 3.5, 平均原子质量 6.51, 密度 1.044 g/cm^3 ; Al 采用 EOS_42 数据, 原子序数 13, 原子质量 26.98,

密度 2.7 g/cm^3 ; 模拟总时长设置为 70 ns, 最大循环次数不超过 10000 次.

第一类靶型模拟了 100 μm 纯 CH 平面靶的冲击动力学过程, 结果如图 4 所示. 图 4(a) 中, 长脉冲加载下冲击波与界面相互作用产生多次加载、卸载过程, 相比短脉冲单次冲击加载过程更为复杂. 图 4(b) 和图 4(c) 分别从空间分布与时间演化角度给出了压缩波逐渐增强到波阵面形成冲击间断的过程. 前期缓慢增强阶段属于典型的准等熵加载, 后期波阵面形成冲击间断, 意味着进入冲击加载阶段, 并且在 30 ns 后发生弱化的二次加载、卸载现象. 图 4(d) 对比模拟了不同激光功率密度下的压力分布, 功率密度降低导致冲击波压力显著降低, 延长了冲击波的增强过程及靶内渡越时间. 因此, “天光一号”长脉冲加载下 100 μm 纯 CH 靶经历了准等熵加载向弱冲击加载的演化过程. 增大靶厚度, 冲击加载会逐渐趋于稳定峰值. 减小靶厚度, 冲击波尚未形成或者还处于增强阶段, 加载过程会更为符合准等熵加载特征, 但薄靶条件下二次甚至多次加载、卸载会导致物理过程复杂化.

第二类靶型模拟了两种镀膜 CH 靶的冲击动力学过程, 结果如图 5 所示. 图 5(a) 和图 5(b) 中, 当冲击波由高阻抗 Al 层向低阻抗 CH 层传播时, 在 Al-CH 界面处反射左行稀疏卸载波对 Al 层不完全卸载 (0 \rightarrow 1 \rightarrow 2 过程), 该过程可以弱化冲击波增强或者延缓冲击波形成. 图 5(c) 中, 相比于纯 CH 靶, Al + CH 镀膜靶加载初期的冲击波强度明显降低, 并呈现斜坡式的准等熵加载特征, 进一步验证了 Al + CH 结构延缓冲击波形成的结论. CH 层厚度对准等熵加载的演化具有重要影响, 150 μm 厚 CH 层条件下准等熵加载会逐渐演化为弱冲击加载; 50 μm 薄 CH 层条件下, 冲击波尚处于增强阶段, 波阵面到达自由面处发生不完全卸载, 削弱后续冲击波的增强, 并导致自由面附近动力学过程变得复杂. 当选择 CH 层作为辐照面时, 冲击波由

表 1 HYADES 程序输入参数
 Table 1. Input parameters of HYADES program.

激光条件	靶结构	靶材料	空间网格	时间步长
波长 248 nm	100 μm CH (纯 CH)	CH: Sesame EOS_32	CH: 1/3 μm	0.1 ns
脉宽 28 ns	10 μm Al + 50 μm CH (镀膜 CH)	Al: Sesame EOS_42	Al: 1/5 μm	
波形类高斯	10 μm Al + 150 μm CH (镀膜 CH)			
功率密度 / ($10^{12} \text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)	150 μm CH + 10 μm Al + 100 μm vacuum + 100 μm CH (飞片靶)			

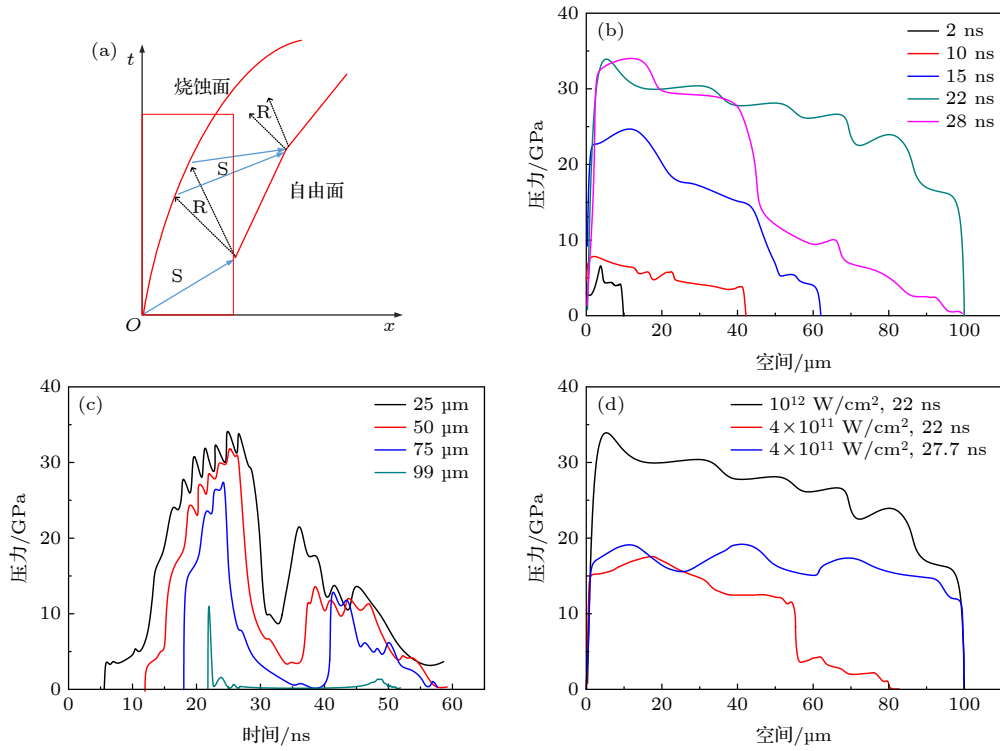


图 4 纯 CH 平面靶的冲击动力学过程 (a) 冲击波与界面作用的 $t-x$ 波系图; (b) 不同时刻的压力空间分布; (c) 不同膜层的压力加载演化史; (d) 不同功率密度下的压力分布

Fig. 4. Shock dynamic processes in CH planar target: (a) $t-x$ schematic diagram of wave propagation; (b) spatial distribution of loading pressure at different time; (c) loading pressure history for different layers; (d) spatial distribution of loading pressure for different laser intensities.

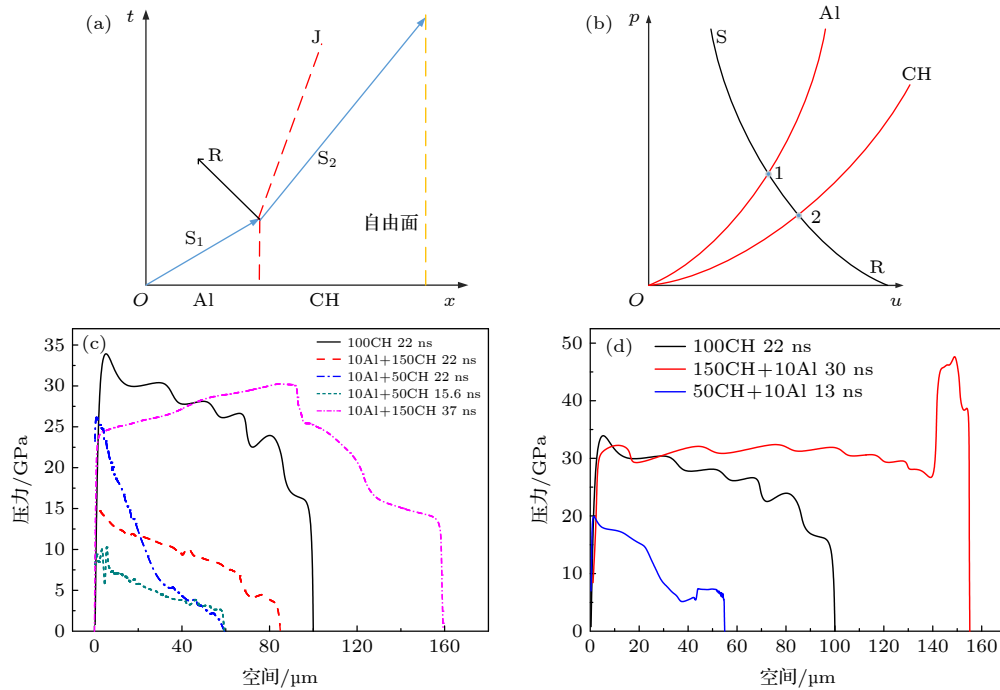


图 5 镀膜 CH 靶内的冲击动力学过程 (a) 冲击波与界面作用的 $t-x$ 波系图; (b) 阻抗梯度 $p-u$ 图; (c) 辐照面为 Al 层的压力空间分布; (d) 辐照面为 CH 层的压力空间分布

Fig. 5. Shock dynamic processes in CH planar target coated with Al: (a) $t-x$ schematic diagram of wave propagation; (b) $p-u$ schematic diagram; (c) spatial distribution of loading pressure when laser directly irradiates Al layer; (d) spatial distribution of loading pressure when laser directly irradiates CH film.

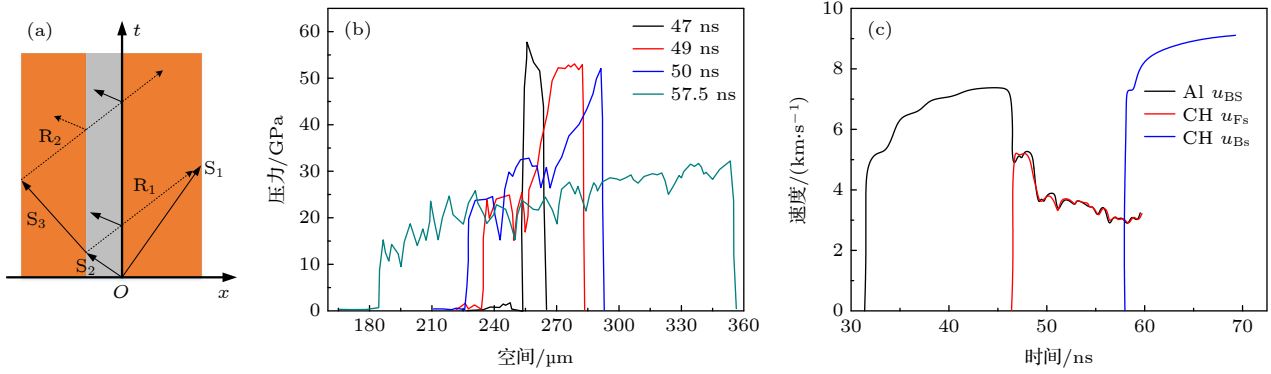


图 6 飞片撞击靶内的冲击动力学过程 (a) 靶内冲击波与界面相互作用 $t-x$ 波系图; (b) 不同时刻靶内加载压力的空间分布; (c) Al 层自由面、CH 靶前后表面速度曲线

Fig. 6. Shock dynamic processes in flyer-impact target: (a) $t-x$ schematic diagram of wave propagation; (b) space distribution of loading pressure at different time; (c) velocity histories of the back-surface velocity of Al layer ($Al u_{BS}$), the front-surface ($CH u_{FS}$) and back-surface ($CH u_{BS}$) velocities of CH target layer.

低阻抗向高阻抗传播会在 CH-Al 界面处反射冲击波, 导致 CH 层产生二次反向加载 (0→2→1 过程). 根据连续性条件, CH-Al 界面附近形成局部高压区, 如图 5(d) 所示. 因此, Al + CH 结构可以延缓冲击波的形成, 有利于开展准等熵加载; CH + Al 结构可以增强冲击波, 更适用于冲击加载.

第三类靶型模拟了飞片撞击靶的冲击动力学过程, 结果如图 6 所示. 为确保飞片撞击前内部残余应力为 0, 采用 150 μm CH 的厚烧蚀层以冲击加载方式加速 Al 层, 经 100 μm 空腔趋于匀速. 图 6(a) 中, 飞片撞击后在 CH 与 Al 层分别产生右行与左行冲击波 S_1, S_2 , 其中 S_2 会在 CH-Al 界面以及 CH 前表面处分别反射右行稀疏卸载波 R_1, R_2 , 并追赶卸载 S_1 . 图 6(b) 中, 撞击初期在 Al-CH 界面附近形成准方波结构的高压区, 波阵面非常陡峭, 属于典型的冲击加载, 且压力超过 50 GPa, 明显高于普通平面靶; 此后, 追赶稀疏波对冲击波 S_1 波后状态进行不完全卸载, 压力降低至 30 GPa, 与普通平面靶结果相当. 通过降低目标靶厚 (小于 30 μm), 使其满足小于追赶条件, 可以实现飞片撞击增压效

果, 但薄 CH 层在制靶与装配过程中的平整性较难保证. 图 6(c) 中, 47 ns 撞击后的 Al-CH 界面两侧的速度满足连续性原理, 58 ns 时刻粒子速度 (约 4 km/s) 跳变为自由面速度 (8 km/s), 符合弱冲击下自由面速度倍增定律.

4 实验结果与讨论

实验测量了不同条件下三种靶型的动态加载过程, 条纹相机侧向阴影图像如图 7 所示. 图中由左至右表示时间, 由上至下表示空间, 图 7(a) 和图 7(b) 两种简单靶型的上亮带表征靶前透过的探测光, 下亮带表征靶后透过的探测光, 中间阴影区域表征靶对探测光的遮挡. 图 7(c) 的飞片撞击靶中飞片层与目标靶层形成两条阴影, 中间细亮带表征空腔透过的探测光. 当激光到达前表面时, 等离子体发光经 532 nm (探测光波长) 滤光片进入条纹相机, 上亮带的异常变亮表征着辐照激光到达. 当波阵面到达自由面时, 自由面运动导致阴影部分向下亮带运动, 形成自由面运动的阴影轨迹, 其斜率表征了自由面运动速度.

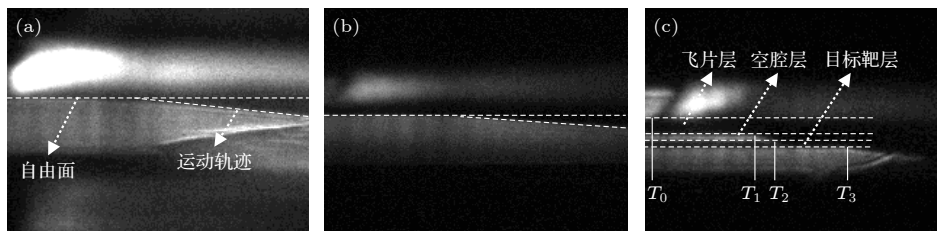


图 7 条纹相机侧向阴影动态图像 (a) 纯 CH 平面靶; (b) Al + CH 平面靶; (c) 飞片撞击靶

Fig. 7. Side-on shadowgraph images of streak camera: (a) CH planar target; (b) Al + CH planar target; (c) flyer-impact target.

表 2 长脉冲激光驱动下的 CH 靶状态方程数据
Table 2. EOS parameters of CH target driven by long pulse laser.

靶参数/ μm	$E_{\text{laser}}/\text{J}$	$u_{\text{fs}}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$u_{\text{pfs}}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$D_{\text{fs}}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$D_{\text{av}}/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	P_{fs}/GPa	$P_{\text{sim}}/\text{GPa}$
180 CH	54	4.26 ± 0.12	2.13 ± 0.06	5.52 ± 0.08	5.31 ± 0.08	12.23 ± 0.39	15.5
110 CH	52.1	4.01 ± 0.10	2.01 ± 0.05	5.36 ± 0.07	4.13 ± 0.08	11.20 ± 0.31	14.1
4.71 Al + 75 CH	72.5	3.34 ± 0.10	1.67 ± 0.05	4.92 ± 0.07	×	8.58 ± 0.38	8.43
150 CH + 10 Al + 空腔 + 100 CH	85	8.14 ± 0.33	4.07 ± 0.16	8.06 ± 0.21	5.46 ± 0.10	34.25 ± 1.61	30.7

高压物态方程实验主要是测量压力 P 、冲击波速度 D 、粒子速度 u 中的两个量, 结合热力学数据实现状态方程的计算, 因此被称为不完全的物态方程^[20]. 本实验根据阴影轨迹与渡越过程测量自由面速度 u_{fs} 与冲击波渡越平均速度 D_{av} . 在准等熵或弱冲击加载下, 根据自由面速度倍增定率可获得末态粒子速度 u_{pfs} ; 根据弱冲击加载理论与 CH 冲击绝热线数据 (声速 $c = 2.73 \text{ km/s}$ 、雨贡钮系数 $\lambda = 1.31$), 可以获得末态的冲击波速度 D_{fs} 及其对应的自由面附近冲击压力 P_{fs} 等参数, 通过比较末态冲击波速度与渡越平均速度的差别作为衡量准等熵加载的判据; E_{laser} 表示该实验发次的激光能量, 模拟该条件可以获得模拟的末态压力 P_{sim} , 上述数据如表 2、图 8 所示. u_{fs} 通过轨迹最小二乘法拟合获得, 测量不确定度取拟合标准偏差, u_{fs} , D_{fs} , P_{fs} 等推导量的不确定度按统计性误差处理方法^[21] 计算获得; D_{av} 通过测量靶厚与渡越时间获得, 其中渡越时间不确定度由读数统计误差与时间标定不确定度计算获得, 条纹相机时间标定结果为 $69.66 \pm 0.48 \text{ ps/pixel}$.

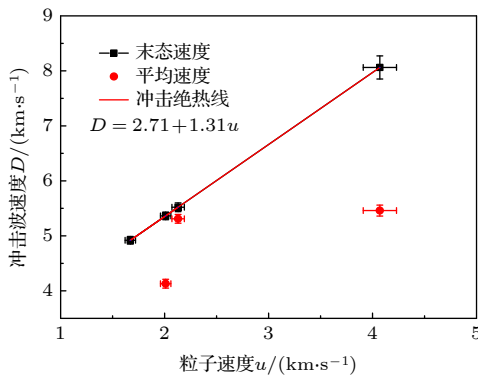


图 8 不同靶型的 D - u 实验数据的比较

Fig. 8. Shock and particle velocities (D - u) of different targets.

第一类纯 CH 平面靶实验中, 两种靶 CH 层厚度均超过 $100 \mu\text{m}$, 根据模拟结果, 靶内冲击波已趋于稳定, 末态的冲击波速度、压力基本相当, 差别

主要源于激光能量不同. 作为准等熵加载的重要判据, 二者的末态冲击波速度均大于渡越平均速度, 说明加载过程存在明显的增强过程, 波阵面压力越高, 对应的波阵面速度越大. 因此, 纯 CH 靶前期加载过程主要是准等熵加载, 后期发展为弱冲击加载. CH 靶厚度决定了准等熵加载过程所占时间份额, 靶厚度越大则渡越平均速度越接近末态冲击波速度. 其中, $110 \mu\text{m}$ 靶的渡越平均速度 4.13 km/s 明显小于 $180 \mu\text{m}$ 厚靶的速度 5.31 km/s , 而且后者非常接近末态冲击波速度 5.52 km/s . 采用 HYADES 程序分别模拟了实验参数条件下束靶作用过程, 与 100 J , $100 \mu\text{m}$ CH 靶过程基本类似, 模拟结果的末态压力为 $14\text{--}15 \text{ GPa}$, 比实验结果 $11\text{--}12 \text{ GPa}$ 略高, 原因可能在于激光能量测量误差以及厚靶的二维效应影响.

第二类 Al + CH 镀膜靶实验中, 在能量提高 20 J 的条件下自由面速度、冲击波速度以及压力仍然低于平面靶, 说明该结构可以有效减缓压力波的增强过程, 有利于实现准等熵加载. HYADES 模拟显示: 与图 5(c) 中 $10 \mu\text{m}$ Al + $50 \mu\text{m}$ CH 靶动力学类似, 加载初期满足准等熵加载过程, 但强度较低, 对应的自由面初始速度小于 0.5 km/s , 导致阴影轨迹斜率过低难以观测; 后续逐渐增强的加载波与自由面反射的卸载波持续作用 (不完全卸载), 导致自由面附近形成低压区, 烧蚀面附近形成高压区. 低压段加载时自由面低速运动, 高压段到达自由面时自由面速度迅速跳变至 3 km/s 以上, 并被条纹相机记录. 高压区压力模拟结果为 8.43 GPa , 与实验结果 8.58 GPa 基本相当. 因此, Al + CH 结构下渡越时间概念不再有效, 实验测量的自由面速度实质上表征了增强型加载波后期高压段到达自由面的结果.

第三类飞片撞击靶实验包含了飞片飞行与 CH 目标层飞行两个过程, 两段飞行轨迹拟合结果显示, 撞击前飞片自由面速度约为 8.5 km/s , 略高于撞击后 CH 层自由面速度 8.14 km/s , 与理论模

拟结果相符 (见图 6(c), 激光能量略低于模拟条件). 因为飞片撞击靶属于典型的冲击加载过程, 其压力明显高于纯 CH 靶与镀膜靶. 在追赶稀疏卸载波作用下, CH 目标靶内冲击波被弱稀疏波不完全卸载, 导致波阵面速度减小, 因此渡越平均速度应略大于末态速度, 但实验结果与该结论不符, 原因可能在于侧向剪切、稀疏以及靶面应力弯曲等影响导致渡越时间明显增大. 撞击后末态压力 34 GPa, 略高于模拟结果 30.7 GPa, 原因主要在于大口径激光能量测量误差超过 5%, 造成二者激光条件出现差别, 模拟追赶稀疏卸载过程自由面附近的波阵面成锯齿结构, 对模拟结果也有一定影响.

此外, 实验图像中存在明显的反向运动信号, 即下亮带底部斜向上的信号, 其运动方向与辐照激光入射方向相反. 该异常现象可能是由靶片剪切撕裂过程中散射的直穿光与靶片支撑结构作用形成等离子体反向运动与发光导致.

5 结 论

本文开展了长脉冲激光驱动下的聚苯乙烯高压状态方程研究, 模拟分析了长脉冲加载下靶内的冲击动力学演化过程, 实验测量计算了不同束靶参数下的自由面速度、冲击波速度、粒子速度、压力等高压状态方程数据, 与理论结果基本符合. 纯 CH 靶与 Al + CH 镀膜靶的冲击波渡越平均速度明显小于末态冲击波速度, 说明靶内压缩波存在缓慢增强过程, 脉冲上升沿前期主要是准等熵加载过程, 后期演化为弱冲击加载过程. 相比之下, 飞片撞击靶的冲击波速度和压力明显增强, 波阵面非常陡峭, 属于典型的冲击加载过程.

参考文献

- [1] Lindl J, Landen O, Edwards J, Moses E 2014 *Phys. Plasmas* **21** 020501
- [2] Ma T, Hurricane O A, Callahan D A, et al. 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 145004

- [3] He X T, Li J W, Fan Z F, Wang L F, Liu J, Lan K, Wu J F, Ye W H 2016 *Phys. Plasmas* **23** 082706
- [4] Campbell E M, Goncharov V N, Sangster T C, et al. 2017 *Matter Radiat. Extrem.* **2** 37
- [5] Barrios M A, Hicks D G, Boehly T R, Fratauduo D E, Eggert J H 2010 *Phys. Plasmas* **17** 056307
- [6] Barrios M A, Boehly T R, Hicks D G, Fratauduo D E, Eggert J H, Collins G W, Meyerhofer D D 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 093515
- [7] Aglitskiy Y, Velikovich A L, Karasik M, et al. 2018 *Phys. Plasmas* **25** 032705
- [8] Huang X G, Fu S Z, Shu H, Ye J J, Wu J, Xie Z Y, Fang Z H, Jia G, Luo P Q, Long T, He J H, Gu Y, Wang S J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6394 (in Chinese) [黄秀光, 傅思祖, 舒桦, 叶君建, 吴江, 谢志勇, 方智恒, 贾果, 罗平庆, 龙滔, 何钜华, 顾援, 王世绩 2010 物理学报 **59** 6394]
- [9] Shu H, Huang X G, Ye J J, Wu J, Jia G, Fang Z H, Xie Z Y, Zhou H Z, Fu S Z 2015 *Eur. Phys. J. D* **69** 259
- [10] Bradley D K, Eggert J H, Smith R F, Prisbrey S T, Hicks D G, Braun D G, Biener J, Hamza A, Rudd R E, Collins G 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 075503
- [11] Smith R F, Eggert J H, Jeanloz R, Duffy T S, Braun D G, Patterson J R, Rudd R E, Biener J, Lazicki A E, Hamza A V, Wang J, Braun T, Benedict L X, Celliers P M, Collins G W 2014 *Nature* **511** 330
- [12] Xue Q X, Jiang S E, Wang Z B, Wang F, Zhao X Q, Yi A P, Ding Y K, Liu J R 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 045202 (in Chinese) [薛全喜, 江少恩, 王哲斌, 王峰, 赵学庆, 易爱平, 丁永坤, 刘晶儒 2018 物理学报 **67** 045202]
- [13] Zhang P L, Tang X Z, Li Y J, Wang Z, Tian B X, Yin Q, Lu Z, Xiang Y H, Gao Z X, Li J 2015 *Chin. Phys. Lett.* **32** 075201
- [14] Zhang P L, Wang Z, Li Y, Tian B X, Li Y J, Yin Q, Tang X Z 2018 *At. Energy Sci. Technol.* **52** 2038 (in Chinese) [张品亮, 王钊, 李宇, 田宝贤, 李业军, 殷倩, 汤秀章 2018 原子能科学技术 **52** 2038]
- [15] Xiang Y H, Gao Z X, Tong X H, Dai H, Tang X Z, Shan Y S 2006 *High Power Laser Part. Beams* **18** 795 (in Chinese) [向益淮, 高智星, 佟小惠, 戴辉, 汤秀章, 单玉生 2006 强激光与粒子束 **18** 795]
- [16] Zvorykin V D, Lebo I G 1999 *Laser Part. Beams* **17** 69
- [17] Tian B X, Liang J, Wang Z, Li Y J, Tang X Z 2012 *At. Energy Sci. Technol.* **46** 39 (in Chinese) [田宝贤, 梁晶, 王钊, 李业军, 汤秀章 2012 原子能科学技术 **46** 39]
- [18] Larsen J T, Lane S M 1994 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **51** 179
- [19] Jiang S E, Li S W 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8440 (in Chinese) [江少恩, 李三伟 2009 物理学报 **58** 8440]
- [20] Jing F Q 1999 *Introduction to Experimental Equation of State* (Beijing: Science Press) p2, 211 (in Chinese) [经福谦 1999 实验物态方程导引 (北京: 科学出版社) 第2, 211页]
- [21] Fu S Z, Huang X G, Ma M X, Shu H, Wu J, Ye J J, He J H, Gu Y, Luo P Q, Long T, Zhang Y H 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 043517

Equation-of-state measurements for polystyrene under high pressure driven by HEAVEN-I laser facility*

Tian Bao-Xian[†] Wang Zhao Hu Feng-Ming
Gao Zhi-Xing Ban Xiao-Na Li Jing

(*Department of Nuclear Physics, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

(Received 1 February 2021; revised manuscript received 1 June 2021)

Abstract

The equation of state (EOS) for CH material used as an ablator layer at high pressure is important in the study of implosion dynamics and target design for inertial confinement fusion (ICF). At present, most of EOS data are on the Hugoniot line under shock compression. The EOS data below Hugoniot line need further studying for low-entropy pre-compression. In the present article, the EOS of polystyrene is established under quasi-isentropic compression driven by HEAVEN-I KrF laser facility with a long rising edge (~20 ns). The shock dynamic behaviors of three kinds of CH targets are simulated, which are 100 μm CH planar target, Al-coated CH planar target (10 μm Al, 50 or 150 μm CH), and flyer-impact target composed of flyer (Al-coated CH), 100 μm vacuum layer, and 100 μm CH layer. The planar targets and flyer-impact targets with different thickness are irradiated by six-focused laser beams with total energy of 50–100J, and the free surface velocity and wave average transit velocity are measured by side-on shadowgraph technique. The simulation results indicate that the initial loading process is quasi-isentropic compression process, and then evolves into a weak shock compression process for the CH planar target in the rising edge stage. Comparing with the CH planar target, the reflected rarefaction waves from the Al-CH interface of Al-coated CH target can suppress the enhancement of compression wave, and delay the formation of shock wave when laser directly irradiates the Al layer. The shock pressure of the CH target layer (the third layer) is significantly higher than those of the former two targets in the flyer-impact target. However, the chasing rarefaction wave can unload the compression state incompletely and reduce the pressure when the CH target layer is much thicker than Al layer. The final pressure is about 15 GPa in the CH planar target, while the final pressure is about 30 GPa in flyer-impact target: both of them are less than the pressure threshold of opacity change for the transparent polystyrene. The quasi-isentropic dynamical process is difficult to measure by the velocity interferometer system for any reflector technique. The experimental results show that the average wave transit velocity is significantly less than the final shock velocity derived from the free surface velocities in the CH and Al-coated CH planar target side-on shadow experiments. They indicate that the compression wave enhancement and quasi-isentropic compression process occur in the propagation of wave front. The shock pressure is about 12 GPa in the CH planar target, and about 34 GPa under shock load in the flyer-impact target. The experimental data and shock dynamic processes are basically consistent with the simulation results.

Keywords: quasi-isentropic compression, side-on shadowgraph, equation of state, shock velocity, particle velocity

PACS: 64.30.Jk, 52.35.Tc, 52.57.-z, 52.50.Lp

DOI: 10.7498/aps.70.20210240

* Project supported by the Continuous Basic Scientific Research Project from Ministry of Finance of China (Grant Nos. WDJC-2019-02, BJ20002501).

[†] Corresponding author. E-mail: tianbaoxian@163.com