

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

薛全喜 江少恩 王哲斌 王峰 赵学庆 易爱平 丁永坤 刘晶儒

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

Xue Quan-Xi Jiang Shao-En Wang Zhe-Bin Wang Feng Zhao Xue-Qing Yi Ai-Ping Ding Yong-Kun Liu Jing-Ru

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 045202 (2018) DOI: 10.7498/aps.20172159

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20172159>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

神光 III 主机上球腔辐射场实验的三维数值模拟与分析

Three-dimensional simulations and analyses of spherical hohlraum experiments on SGIII laser facility

物理学报.2018, 67(2): 025202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20170521>

神光 III 主机极向驱动靶丸表面辐照均匀性

Laser irradiation uniformity for polar direct drive on ShenGuang III facility

物理学报.2017, 66(14): 145202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.145202>

神光 III 激光装置直接驱动内爆靶产生的连续谱 X 光源

Spectrally smooth X-ray source produced by laser direct driven DT implosion target on SG-III laser facility

物理学报.2017, 66(11): 115202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.115202>

基于光束参量优化实现直接驱动靶丸均匀辐照

Uniform irradiation of a direct drive target by optimizing the beam parameters

物理学报.2017, 66(10): 105202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.105202>

基于焦斑空间频率全域优化的偏振匀滑设计

Polarization smoothing design for improving the whole spatial frequency at focal spot

物理学报.2014, 63(21): 215202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.215202>

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*

薛全喜^{1)2)†} 江少恩¹⁾ 王哲斌¹⁾ 王峰¹⁾ 赵学庆²⁾ 易爱平²⁾
丁永坤¹⁾ 刘晶儒²⁾

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (西北核技术研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 西安 710024)

(2017年9月29日收到; 2017年12月7日收到修改稿)

整形激光驱动准等熵压缩是高效的物质动态压缩方式, 是开展材料高压压缩特性研究的重要手段. 本文系统介绍了近年来基于神光III原型激光装置开展的整形激光直接驱动准等熵压缩研究工作: 创立了凝聚态物质的准等熵压缩理论模型, 改进了实验设计方法和数据处理方法, 掌握了制靶工艺, 开展了激光加载实验并在多种靶型中实现了数百 GPa 的准等熵压缩. 实验获取的参数范围超过传统加载方式, 数据质量达到国际先进水平.

关键词: 准等熵压缩, 特征线, 高压物理, 整形激光

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

DOI: 10.7498/aps.67.20172159

1 引言

准等熵压缩是一种高效的物质动态压缩手段, 其加载速率低, 产生的熵增小, 可以在材料中实现高压且相对低温的物质状态. 该研究内容在武器物理、激光惯性约束聚变、天体物理等研究方向中均有重要应用^[1-6]. 例如, 激光惯性约束聚变中聚变材料的压缩过程即为准等熵压缩过程^[6]. 目前, 利用冲击压缩可以实现这样的超高压强, 但会产生剧烈温升, 只有准等熵压缩可以实现这种超高压且相对低温的物质状态. 只要人们掌握了有力的准等熵压缩工具, 即有望在实验室创造出行星的内部状态, 开展星体特性的细致研究工作.

在该研究领域, 在几十年的时间里研究者先后发展出了电磁脉冲加载^[7,8]、化爆^[9]、气炮加载阻抗梯度飞片等^[10]加载方法. 但这些方法目前实现的

最高准等熵压缩压强仅为几百 GPa^[11], 一直难以获得显著突破. 近年来, 世界大国在激光整形方面都取得了巨大进步, 已可以实现对激光脉冲波形的任意整形. 这给准等熵压缩研究带来了前所未有的发展机遇, 使得整形激光驱动准等熵压缩成为了一种具有强大研究潜力的方法. 截至目前, 美国等国家已在 NIF, OMEGA 等多个大型激光装置上开展了大量整形激光加载的准等熵压缩实验^[1,4,12-15], 先后获得了几十 GPa 至数 TPa 的加载压强, 远远超过了传统方法, 并达到了研究大型天体内部状态的实验能力. 这些研究中, 最具有代表性的研究成果是美国利弗莫尔实验室在 2014 年利用 NIF 装置在金刚石中实现了 5 TPa 的峰值压强, 材料压缩率达到 3.9 倍^[1], 这是人类在实验室通过准等熵压缩方式获得的最高物质压强参数. 在国际上获取重大进展之际, 我国也应抓住机遇开展相应的研究工作.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11475154, 11305156)、科学挑战专题 (批准号: TZ2016001) 和激光与物质相互作用国家重点实验室基金 (批准号: SKLLIM1606) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: quanxixue@163.com

在激光驱动惯性约束聚变研究的牵引下,我国高功率激光物理联合实验室(由中国科学院与中国工程物理研究院共建)和中国工程物理研究院先后建成了神光II激光装置、神光III原型激光装置、神光III主机激光装置和星光III激光装置等多套大型高功率激光装置,这些激光装置的技术指标处于世界先进水平,均具有开展整形激光加载准等熵压缩研究的能力.在此有利条件下,中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所舒桦等^[16]2012年利用神光II激光装置开展了激光直接驱动准等熵压缩实验,并获得了Al材料的准等熵压缩图像.我们从2012年开始开展了理论、制靶、数据处理方法等研究工作^[17–20],并从2013年开始在神光III原型激光装置上开展整形激光直接加载实验,已在多种靶型中成功获得了高质量的实验数据和数百GPa的加载压强^[21–23].本文主要对我们获得的研究成果做系统介绍.

2 激光加载方法的特点

激光加载压力来源于激光与物质相互作用,作用过程产生的强X光辐射甚至超热电子需要被阻拦;另外,激光脉冲宽度窄、光斑小,决定了靶的厚度和尺度相对传统加载方式小.这使得激光加载方式对加载压力波形要求更高、靶结构更为复杂、实验设计方法和数据处理方法需具有更强的适用性.

在压力波形控制方面,激光加载时间尺度为0–30 ns,较电磁加载等传统加载方式短一个数量级,而加载压力却高一个量级.也就是说,要在更短的时间尺度和更宽的压力范围内将材料缓慢压缩且不能出现冲击波,这需要比传统加载方式更加精密地控制加载压力波形的形状.这种控制精度最终会转移到实验设计和激光波形整形上.

在靶的结构方面,激光脉冲短、光斑小导致靶的空间尺度非常小且厚度小,样品的厚度往往仅有10 μm级,横向尺寸仅为mm级.为阻拦强X光辐射甚至超热电子对材料的预热、提升加载压强范围,靶结构变得复杂,常为多层结构,一般包含烧蚀层、阻挡层、样品层、窗口等.如此复杂的靶结构对制靶工艺和测量技术提出了极高要求.

在实验设计方法和数据处理方法方面,传统方法已不能满足要求.由于靶内压力波结构非常复杂,传统方法中常用的简单波近似偏差很大.这

需要发展适用性更高的数据处理方法和实验设计方法.

3 主要进展

3.1 压缩理论

准等熵压缩理论研究有助于对压缩过程的物理理解以及压缩实验的设计,是开展物理实验的基础工作.由压缩理论可知,在准等熵压缩流场内,后产生的强声波追赶上前期产生的弱冲击波或者声波时会产生冲击波.在数学上,所有的声波同时交叉汇聚于空间一点时,准等熵的空间范围存在最大值.基于这种思想,众多知名科学家先后给出了单一均匀、足够厚度的流场的最佳加载压力波形.1972年,Hawke等^[24]给出了最佳压力波形为材料密度的多项式,但表达式中存在众多的指数和系数难以确定,无法在实验设计中使用.1972年,利弗莫尔实验室的Nuckolls等^[25]由理想气体方程推导出了球形压缩最佳压力波形,但其推导基于理想气体方程且为球一维形式,无法应用于固体材料的准等熵压缩研究.2004年,Atzeni和Meyer-ter-Vehn^[26]给出了基于理想气体状态方程的压力波形的显式表达式.2005年,Davis等^[27]提出在单一材质、均熵、足够厚度的介质加载面上最佳的拉格朗日声速时间分布.2008年,Swift等^[28]基于Davis的理论模型进一步给出了加载面上密度的时间分布.显然,准等熵压缩理论一直在不断发展,但以上理论结果在实际使用中还不够方便.若能得到加载面上加载压力的解析表达式,则非常有利于实验应用.

我们在前人的基础上进一步研究了加载理论.基于上述多种理论成果的物理思想,我们发现若状态方程中压力表达式为密度的函数,则有可能获取压力波形的显式表达形式.进而将凝聚态物质的Murnaghan状态方程^[29]引入到了压力波的推导中,最终获取含时的压力波形显式表达式:

$$p(t) = \rho_0 c_0^2 / \gamma [(1 - t/t_0)^{-2\gamma/(\gamma+1)} - 1], \quad (1)$$

式中 x , t , ρ , p 分别表示空间坐标、时间坐标、密度、压强.(1)式中包含了理论上冲击波出现的时间 t_0 、最大等熵空间尺度 $c_0 t_0$ 、状态方程系数 γ 、常态声速 c_0 和密度 ρ_0 等基本参数,因此,可以非常方便地得到压力波波形与物质种类、激光加载时间等参数之

间的关系. 加载面上的密度和声速分别表示为:

$$\rho(t) = \rho_0(1 - t/t_0)^{-2/(\gamma+1)}, \quad (2)$$

$$c(t) = c_0(1 - t/t_0)^{(1-\gamma)/(\gamma+1)}. \quad (3)$$

由黎曼不变量表达式可以进一步推导得到流场内部密度、声速、压强、粒子速度等物理参数的表达式:

$$\rho(x, t) = \rho_0 \left[1 - \frac{t - \frac{x(t_0 - t)}{h - x}}{t_0} \right]^{-\frac{2}{\gamma_0+1}}, \quad (4)$$

$$c(x, t) = \frac{c_0 t_0 - x}{t_0 - t} \left[1 - \frac{t - \frac{x(t_0 - t)}{c_0 t_0 - x}}{t_0} \right]^{\frac{2}{\gamma_0+1}}, \quad (5)$$

$$p(x, t) = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma_0} \left[\left(1 - \frac{t - \frac{x(t_0 - t)}{c_0 t_0 - x}}{t_0} \right)^{\frac{-2\gamma_0}{\gamma_0+1}} - 1 \right], \quad (6)$$

$$u(x, t) = \frac{2c_0}{\gamma_0 - 1} \left[\left(1 - \frac{t - \frac{x(t_0 - t)}{c_0 t_0 - x}}{t_0} \right)^{\frac{1-\gamma_0}{\gamma_0+1}} - 1 \right]. \quad (7)$$

在引入激光烧蚀定标率后, 由加载压力波形可以得到加载激光波形的表达式:

$$I_L = 4.16(A/2Z)^{-1/2} \lambda_L \rho_0^{3/2} c_0^3 \gamma^{-3/2} \times 10^{-4} [(1 - t/t_0)^{-2\gamma/(\gamma+1)} - 1]^{3/2}, \quad (8)$$

该表达式中包含了烧蚀材料的组成元素的原子序数 Z 和原子量 A 、初始密度 ρ_0 、冲击波形成时刻 t_0 、状态方程系数 γ 、激光波长 λ_L 等诸多重要信息, 使用和分析起来非常直观方便.

在此需要强调的是, 以上理论结果只能用于理想情况, 即靶材料单一均匀且有足够厚度. 但在激光加载实验中, 靶的结构非常复杂, 以上理论模型可以用于激光波形的初始理论设计.

3.2 实验设计和数据处理方法研究

精确的实验设计和准确的实验数据处理在该研究领域占有重要位置, 常用的方法有流体力学程序计算模拟^[30]、拉格朗日分析法^[31]、迭代式拉格朗日分析法^[32]、反向积分法^[33]、特征线法^[34]等, 但这些方法不能完全满足整形激光加载实验

的需要. 我们在掌握各种传统方法的基础上, 将Murnaghan状态方程引入到特征线法中, 并解决了特征线的相交、特征线与界面的相交等问题, 使得该方法可以用于多层靶的加载计算. 该特征线法具有流体力学程序不具有的优点. 例如, 可将压缩流场沿特征线划分, 从而可对界面速度中各种畸变追根溯源, 进而可对加载压力波形做出微调. 此外, 该方法还可以给出反射波到达加载面的时间, 有利于加载波形和靶厚度的匹配. 这些功能在实验设计中非常实用. 实验应用证实, 该方法具有上述优点以及比较好的可靠性.

为了展示该方法的这些特点, 我们利用该方法对美国Sandia国家实验室的Z加速器上的多个准等熵压缩的实验结果^[35,36]进行了进一步处理, 在此给出了部分代表性结果. 2006年, Davis在已知加载面压力波形的前提下, 测得了920, 1219, 1518, 1821 μm 四种厚度的Al样品自由面速度^[36]. 基于已知实验加载压力波形开展了正向计算, 获取了基于其他方法难以获取的诸多有用信息, 有反射波达到加载面的时间点、黎曼不变量分布等.

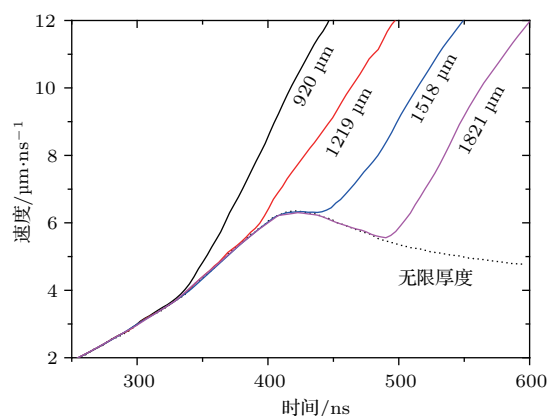


图1 加载面处的粒子速度随时间的变化

Fig. 1. Particle velocities on loading surface.

在实验设计中, 反射波达到加载面的时间点对实验设计非常重要, 该方法清晰地给出了这些时间点, 即为如图1中实线偏离点状虚线的时刻.

图2给出了自由面速度的理论结果与实验结果, 其中实线为实验结果, 虚线为理论结果. 对比二者可知, 理论结果和实验结果符合得非常好, 这充分证实了该计算方法的有效性. 图3为四种靶内部特征线分布情况, 几乎流场内的任何信息都可以通过流场内的黎曼不变量经过运算给出. 例如, 粒

子速度与正向传输黎曼不变量与反向传输黎曼不变量的和成正比, 黎曼不变量时间梯度大的时刻自

由面速度变化快, 黎曼不变量梯度较小时, 粒子速度变化小.

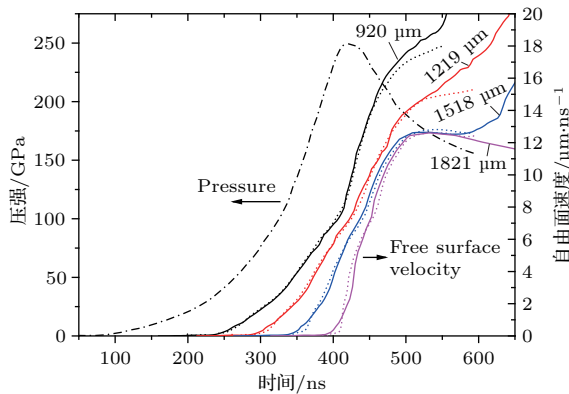


图2 加载压力和自由面速度随时间的变化

Fig. 2. Loading pressure and free surface velocities.

3.3 制靶工艺研究

实验设计在实现物理思想的同时还需要兼顾制靶工艺, 理想的靶构型在现实中往往无法实现. 例如, 镀膜技术一般离不开高温, 而有些材料耐不了高温, 或耐得了高温但会在材料降温后产生影响靶面型的应力, 甚至导致靶破碎. 一般而言, 物理设计和制靶工艺之间存在反复迭代过程. 目前, 激光聚变研究中心可以制作出多台阶靶、多层膜台阶靶、多层膜平面靶等多种靶型, 使用的材料主要有 CH, Au, Fe, Al, LiF 等. 台阶加工精度和膜层加工精度达到 $0.1 \mu\text{m}$, 测量精度达到纳米级.

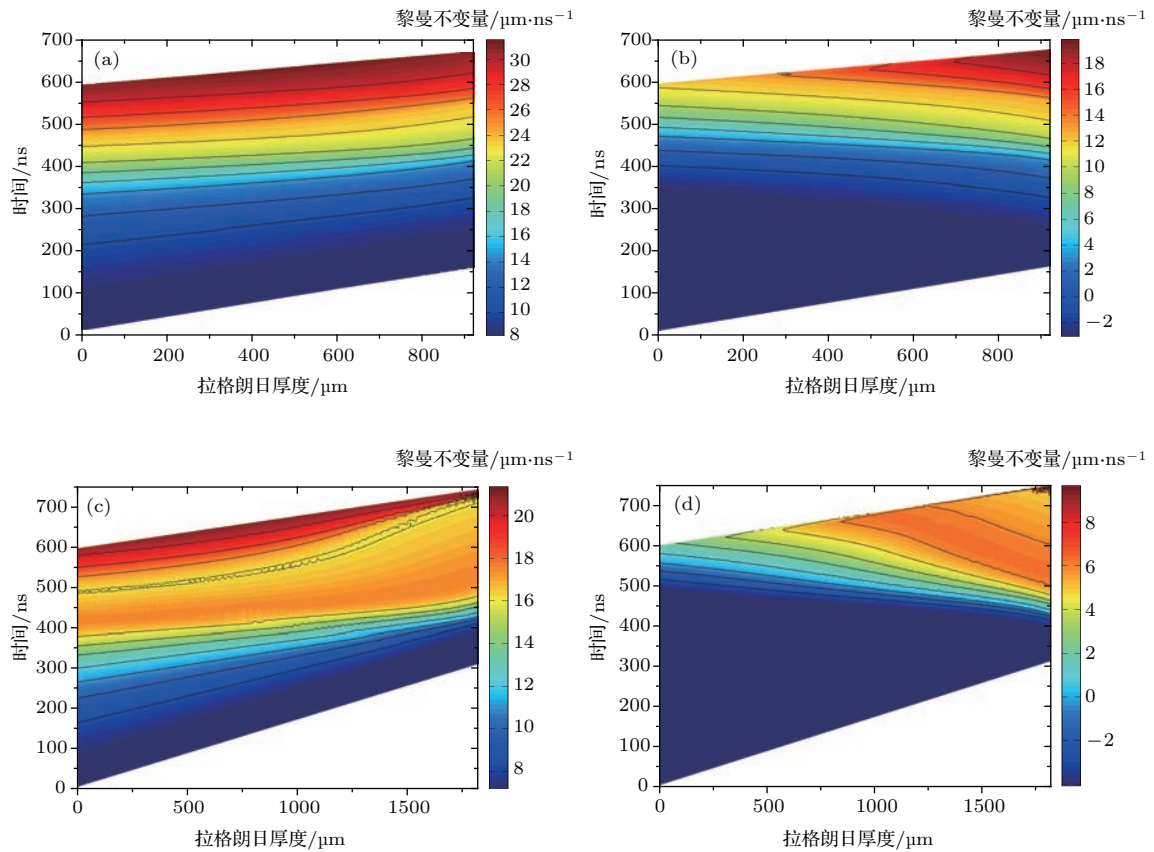


图3 特征线的分布 (a) $920 \mu\text{m}$ 正向黎曼不变量; (b) $920 \mu\text{m}$ 反向黎曼不变量; (c) $1821 \mu\text{m}$ 正向黎曼不变量; (d) $1821 \mu\text{m}$ 反向黎曼不变量

Fig. 3. Characteristics distributions: (a) Forward characteristics in the $920 \mu\text{m}$ aluminum target; (b) backward characteristics in the $920 \mu\text{m}$ aluminum target; (c) forward characteristics in the $1821 \mu\text{m}$ aluminum target; (d) backward characteristics in the $1821 \mu\text{m}$ aluminum target.

3.4 整形激光直接加载准等熵压缩实验

目前, 已在神光III原型激光装置上先后开展了多轮共计20余发整形激光直接加载准等熵压缩

实验, 获得了大量有效实验数据^[21]. 靶的结构经历了多次改进, 实验数据质量和参数范围也不断提高. 以下依次给出了五种典型靶型结构和对应的代表性结果.

神光III原型激光装置可输出九束激光, 其中八束输出能力为1250 J/351 nm/束, 第九束的输出能量3000 J/351 nm/束. 这九束激光均具有任意整形能力, 脉冲宽度在1—20 ns之间连续可调. 除此以外, 装置上还配有任意反射面速度干涉仪 (velocity interferometer system for any reflector, VISAR), X光针孔相机等多种配套诊断设备.

实验布局如图4所示, 先后采用1—4路随机相位板 (continuous phase plate, CPP) 匀滑激光对靶进行直接加载, 并分别采用针孔相机和VISAR诊断激光焦斑形貌和靶的界面速度或自由面速度. 实验中, 加载激光波形由(1)式及特征线法根据靶的结构设计得到.

实验中使用了五种靶, 它们依次是三台阶Al靶、平面Al复合靶、三台阶Al复合靶、平面加Au阻挡层Al复合靶、三台阶加Au阻挡层Al复合靶, 在图5中对应编号依次为(a), (b), (c), (d), (e). 这些靶的构型为根据实验结果依次改进形成.

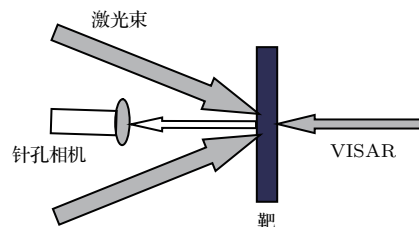


图4 实验布局示意图

Fig. 4. Schematic arrangement of experimental setup.

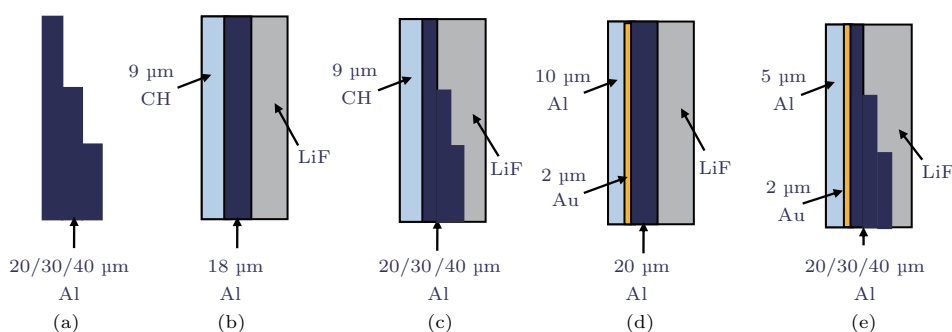


图5 靶结构示意图

Fig. 5. sketches of target configuration.

第一类实验为三台阶Al靶加载实验, 该靶结构简单, 如图5(a)所示, 主要用来验证上文所述的理论模型. 在此给出三台阶Al靶的典型实验结果如图6和图7所示. 本发次激光能量为970 J. 图6给出了靶面激光光斑、激光波形、加载压力波形等信息. 光斑口径约为2 mm, 经数据拟合, 截面光强满足3阶超高斯分布, 如图6中的插图所示. 而VISAR所测试区域对应光斑中心方圆600 μm的部分, 在该区域光强近似为平顶分布, 满足一维加载近似. 由于聚焦系统、光束质量和CPP在以下实验中均相同, 激光光斑形貌保持不变, 以下实验中不再给出光斑形貌相关数据. 图7给出了靶后自由面界面速度的实验测试结果和理论计算结果, 实验测试结果只能对应部分理论结果. 用特征线法对图7中的靶后界面速度进行处理, 得到靶面加载压力曲线, 如图6中点状曲线所示. 显然, 其范围明显小于由激光波形得到靶面加载压力波形范围, 仅有194 GPa, 但二者趋势符合得很好. 实验中没能测量到全部理论结果的原因为冲击波在靶的后界面转化为稀疏波, 加载强度较大时, 强大的稀疏波会

将靶的后界面破坏. 由该实验结果可以得到的结论为: 激光波形和靶的构型的设计是成功的, 即可以实现准等熵压缩, 但存在一个缺点是可实现的压强范围较低. 导致压强范围较低的原因为, 压缩波在靶的后自由面反射形成稀疏波, 进而破坏自由面, 在自由面无法保持为完整平面时, 探针光无法反射回VISAR.

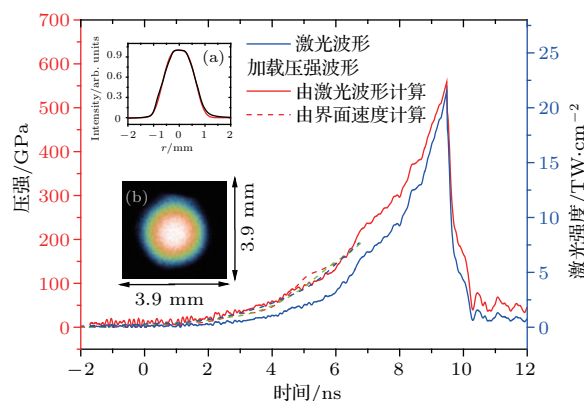


图6 三台阶Al靶靶面激光光斑、激光波形、加载压力波形

Fig. 6. Laser intensity profile, focal spot and pressure history on loading surface of three-step aluminum target.

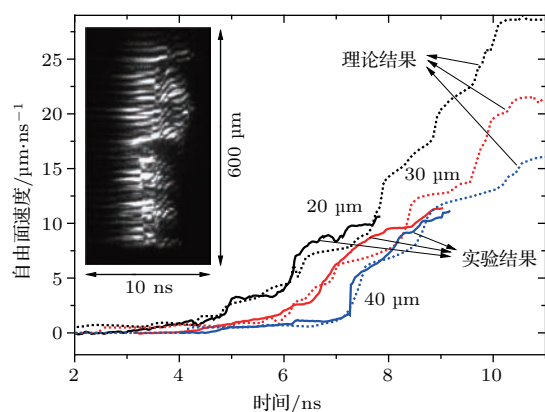


图7 三台阶 Al 靶后自由面速度

Fig. 7. Free surface velocities of three-step aluminum target.

第二类实验为平面 Al 复合靶加载实验, 靶结构如图 5(b) 所示. 该实验目的有三个: 验证加载的一致性、加 CH 烧蚀层降低 X 光对靶材预热、加窗口提高压强范围. 在此给出的典型结果如图 8 和图 9 所示, 该发次采用四束整形激光进行加载, 到靶激光能量为 1921 J. 由图 8 可知, 激光光斑和激光波形基本保持不变. 由图 9 可见, 加载的一致性非常好, 这说明靶面激光具有较高的匀化效果. 此外, 该发次测量到的最高速度为 11 km/s. 而由 MULTI 辐射流体力学程序进行模拟发现, 最高速度 12 km/s, 二者对比可知 11 km/s 以后的数据没有测量到. 比较实验结果和计算结果得到, 11 km/s 速度对应的 Al/LiF 界面压强为 645 GPa. 显然, 该靶型相对三台阶 Al 靶大幅度提高了压强上限.

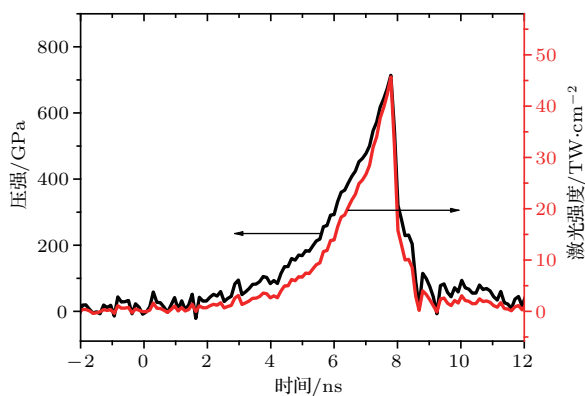


图8 平面 Al 复合靶实验激光波形、加载压力波形

Fig. 8. Laser intensity profile, focal spot and pressure history on the loading surface of planar aluminum target experiment.

第三类实验为三台阶 Al 复合靶加载实验, 靶结构如图 5(c) 所示. 该实验的目的为获取多台阶速度数据, 并进而获取应力-密度曲线. 在此给出

的典型发次共采用了两束整形激光进行加载, 到靶激光能量为 740 J. 图 10 中给出了三台阶界面速度数据, 三个界面速度包含上升下降过程, 且启动顺序区别明显. 但实验数据中依然存在缺陷, 在界面速度下降过程中, VISAR 速度曲线减弱, 然后消失. 我们采用 Hayes 提出的正向计算与特征线方法相结合的方法对该发数据进行处理, 获得了应力-密度曲线, 实验结果峰值压强为 425 GPa, 如图 11 所示. 为便于比较, 还给出了两个文献结果以及基于 Sesame 数据库的理论冲击应变线和理论等熵绝热线 [37]. 两个文献结果为 Smith 等 [38] 和 Davis [36] 在 OMEGA 激光装置和 Z 加速器上的实验结果, 分别在 Al 样品中实现了 110 GPa 和 210 GPa 的峰值压强. 与上述实验进行比较, 本实验所得到的应变线稍高于 Z 加速器上的实验结果, 但与 OMEGA 激光装置上的结果高度接近. 分析认为, 造成这种区别的原因是 Z 加速器加载时间为百纳秒量级,

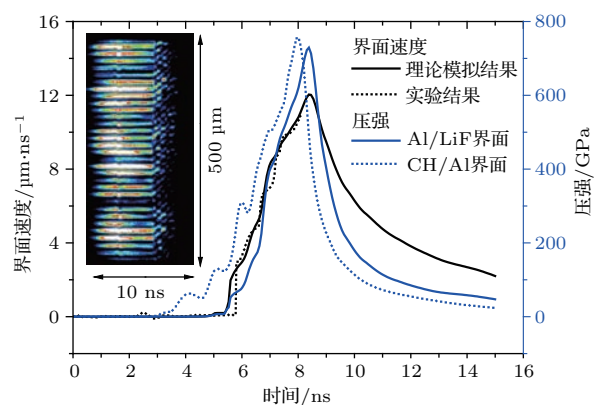


图9 平面 Al 复合靶界面速度与靶内压强

Fig. 9. Interface velocities and pressure history on Al/LiF interface of planar aluminum target.

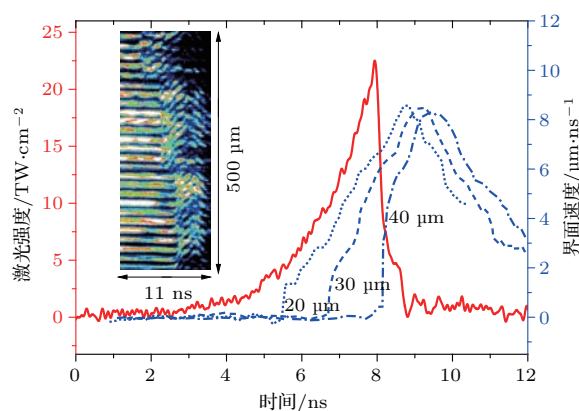


图10 三台阶 Al 复合靶靶内界面速度与激光波形

Fig. 10. Laser intensity profile and interface velocities of CH-coated three-step aluminum target.

比OMEGA激光装置脉冲宽度和本实验所用神光III原型装置大一个量级. 因此, Z加速器上实现的材料压缩过程等熵程度更高. 目前尚未见现比该实验结果更高的报道, 换言之, 本实验得到的425 GPa峰值压强为国际公开发表的Al材料最高准等熵压缩实验结果.

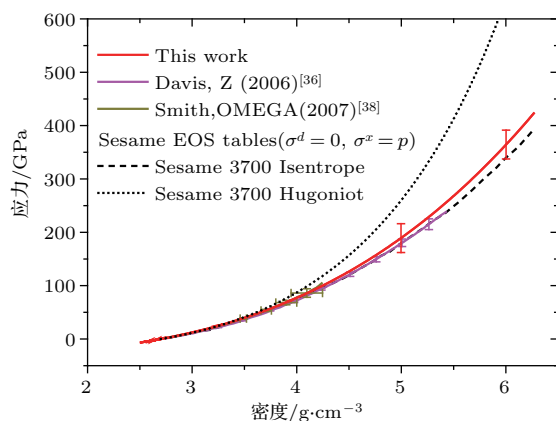


图11 应力-密度曲线

Fig. 11. Stress-density curve.

我们针对该发次中VISAR数据丢失的现象开展了研究, 发现压致温升和X光电离双重作用导致LiF窗口的离化, 离化产生的自由电子对VISAR探针光有明显吸收. 最后, 基于Drude模型推导得到了探针光的衰减规律表达式^[21].

为进一步验证并解决X光电离导致LiF窗口的离化的现象, 我们开展了第四类实验, 即平面加Au阻挡层Al复合靶加载实验, 在此给出的典型发次采用四束激光进行加载, 激光能量为846 J, 靶结构如图5(d)所示, Au阻挡层的作用为阻挡烧蚀层产生的X光. 图12为靶面实验激光波形, 其形状由特征线法设计得到. 图13给出了测量得到的Al/LiF界面处VISAR测试结果、界面速度以及由该结果进一步处理得到的各界面处的压强分布. 由图13中VISAR结果可以看出, 对靶进行改进后, 实验数据质量大幅度上升, 靶内界面速度数据更加清晰, 弱冲击波没有出现, 即压缩过程是近乎完美的准等熵压缩过程. 该数据质量与美国在OMEGA装置上获得的数据质量相当. 此外, Al材料中最高界面速度和压强分别达到7.28 km/s和327 GPa.

由该实验可以得出以下三个结论: 首先, 加Au阻挡层后, VISAR数据质量大幅度提升, 说明X光电离相对压致电离对VISAR数据质量具有更重要的影响. 其次, 第二类和第三类实验中出现的弱冲

击波消失, 说明Al烧蚀层本身具有相对CH更高的不透明度, 是更为合适的烧蚀材料. 最后, 利用该靶型和整形激光直接加载方式可以实现高质量的327 GPa以下的准等熵压缩.

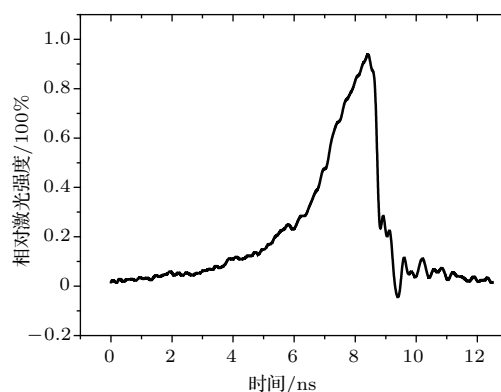


图12 平面加Au阻挡层Al复合靶加载激光波形

Fig. 12. Laser intensity profile of planar aluminum target with Au blocking layer.

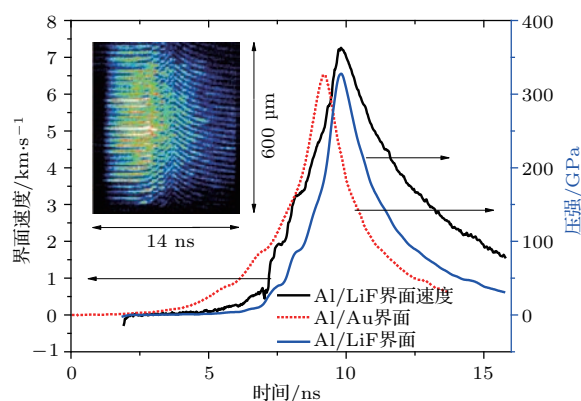


图13 平面加Au阻挡层Al复合靶靶内界面速度与靶内压强

Fig. 13. Interface velocities and pressure distribution of planar aluminum target with Au blocking layer.

为了研究该靶型可以实现的压强上限, 并进一步确认X光电离对VISAR数据质量具有更为重要的影响, 我们在保持激光波形不变的前提下进一步提升激光功率密度开展了三台阶加Au阻挡层Al复合靶加载实验, 靶结构如图5(e)所示. 在此给出的典型发次采用四束激光进行加载, 激光能量为1285 J, 结果如图14和图15所示. 由图14可见, 通过提升激光功率密度, 界面速度得到了大幅度提升, 但在10.5—11 ns时间段内三个台阶上的VISAR数据强度同时出现减弱, 又同时恢复, 而这个时间段刚好对应于激光脉冲的峰值时刻. 经采用特征线法处理, 得到材料内部最高压强为570 GPa.

由以上结果可以得到以下结论: 1) 压力波传输速度慢, 因此压致电离导致的致盲现象在各台阶上会先后出现, 而在该实验中致盲现象是同时出现且时间对应于激光功率密度峰值时刻, 足以说明X光电离是导致VISAR致盲的首要原因; 2) 改靶型可以实现570 GPa以下的准等熵压缩, 压强参数相对前几种靶型有了显著提升; 3) 这种压强参数已经超过国际上公开发表的电磁加载和化爆加载等传统加载方式.

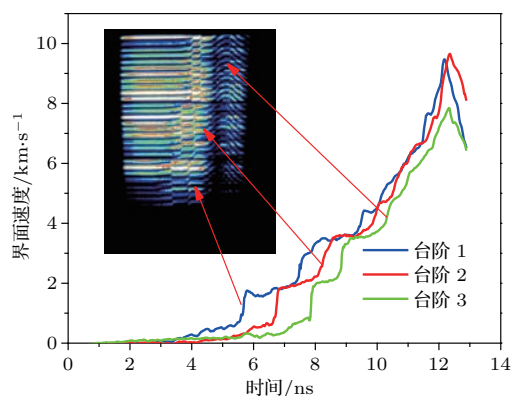


图 14 三台阶加 Au 阻挡层 Al 复合靶靶内界面速度
Fig. 14. Interface velocities of three-step aluminum target with Au blocking layer.

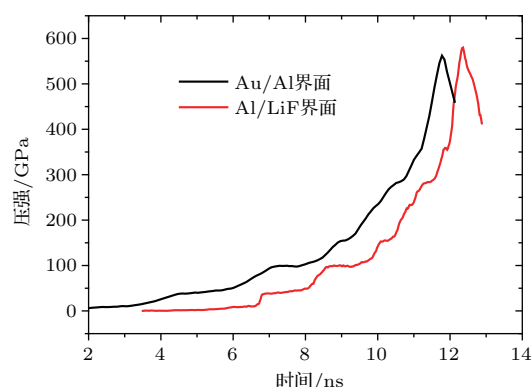


图 15 三台阶加 Au 阻挡层 Al 复合靶靶内压强
Fig. 15. Pressure histories in three-step aluminum target with Au blocking layer.

4 结 论

依次开展了加载理论、实验设计方法、实验数据处理方法、制靶工艺和加载实验等一系列研究工作, 靶型结构、实现的压强参数和数据质量不断迭代提升, 在多种靶型中实现了数百 GPa 的准等熵压缩. 取得的研究结果显示, 整形激光直接加载可实现较高质量的准等熵压缩, 相对传统加载方式具有参数范围优势.

5 后续工作展望

基于前期工作, 我们认为以下后续工作具有重要研究价值.

1) 已开展的实验所用激光能量为 kJ 级, 而中国工程物理研究院激光聚变中心已建成的神光 III 主机装置具有 180 kJ 的输出能力, 显然激光装置尚有非常大的裕量. 当前, 对直接加载方式而言, 存在的主要问题为加载过程中产生得很强的 X 光甚至超热电子都会对材料进行预热, 使得压缩过程偏离绝热过程, 同时也影响了实验数据质量. 该工作的主要后续研究内容为设计出更优且易加工的靶结构.

2) 整形激光直接加载已在几种靶型中实现了数百 GPa 的较高质量的准等熵压缩, 这为开展高压物性研究提供了重要研究平台. 因此, 基于该加载方式, 可以开展数百 GPa 范围内高压物性研究工作.

3) 整形激光加载对较小的激光装置而言是一种实现高参数范围的实验方法, 但对更大激光装置而言间接驱动拥有优势. 这是因为采用金属黑腔对整形激光进行时间和空间匀滑, 可以提升加载的平面一致性和等熵效果. 采用神光 III 主机装置完全有能力获取 TPa 级的加载结果, 从而为众多超高压研究工作提供了研究平台.

感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心神光 III 原型激光装置运行人员、制靶工作人员、物理实验诊断人员以及四川大学物理系张志友副教授等在本研究中的辛苦付出.

参考文献

- [1] 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
- [2] Laio A, Bernard S, Chiarotti G, Scandolo S, Tosatti E 2000 *Science* **287** 1027
- [3] Remington B, Drake R P, Ryutov D D 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 755
- [4] Bradley D K, Eggert J H, Smith R F, Priskrey S T, Hicks D G, Braun D G, Biener J, Hamza A, Rudd R E, Collins G 2009 *Phys. Rev. Lett.* **102** 075503
- [5] Guillot T 1999 *Science* **286** 72
- [6] Lindl J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933

- [7] Davis J P 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 103512
- [8] Reisman D B, Wolfer W G, Elsholz A, Furnish M D 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 8952
- [9] Baer M R, Hall C A, Gustavsen R L, Hooks D E, Sheffield S A 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 034906
- [10] Ray A, Menon S V G 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 064501
- [11] Hawke R S, Duerre D E, Huebel J G, Keeler R N, Wallace W C 1978 *J. Appl. Phys.* **49** 3298
- [12] Lorenz K T, Edwards M J, Jankowski A F, Pollaine S M, Smith R F, Remington B A 2006 *High Energy Density Physics* **2** 113
- [13] Edwards J, Lorenz K T, Remington B A, Pollaine S, Colvin J, Braun D, Lasinski B F, Reisman D, McNaney J M, Greenough J A, Wallace R, Louis H, Kalantar D 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 075002
- [14] Smith R F, Pollaine S M, Moon S J, Lorenz K T, Celliers P M, Eggert J H, Park H S, Collins G W 2007 *Phys. Plasma* **14** 057105
- [15] Smith R F, Eggert J H, Rudd R E, Swift D C, Bolme C A, Collins G W 2011 *J. Appl. Phys.* **11** 0123515
- [16] 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]
- [17] Xue Q, Wang Z, Jiang S, Ye X, Liu J 2014 *AIP Adv.* **4** 057127
- [18] Xue Q, Jiang S, Wang Z, Wang F, Hu Y, Ding Y 2016 *Physica B* **495** 64
- [19] Xue Q X, Jiang S E, Wang Z B, Zhang H, Ye X S, Zhang Y S 2014 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **34** 17 (in Chinese) [薛全喜, 江少恩, 王哲斌, 章欢, 叶锡生, 张永生 2014 核聚变与等离子体物理 **34** 17]
- [20] Xue Q X, Jiang S E, Wang Z B, Zhang H, Ye X S, Zhang Y S 2013 *High Power Laser and Particle Beam* **25** 2891 (in Chinese) [薛全喜, 江少恩, 王哲斌, 章欢, 叶锡生, 张永生 2013 强激光与粒子束 **25** 2891]
- [21] Xue Q, Wang Z, Jiang S, Wang F, Ye X, Liu J 2014 *Phys. Plasmas* **21** 072709
- [22] Zhang Z Y, Zhao Y, Xue Q X, Wang F, Yang J M 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 205202 (in Chinese) [张志宇, 赵阳, 薛全喜, 王峰, 杨家敏 2015 物理学报 **64** 205202]
- [23] Wang F, Peng X S, Xue Q X, Xu T, Wei H Y 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 085202 (in Chinese) [王峰, 彭晓世, 薛全喜, 徐涛, 魏惠月 2015 物理学报 **64** 085202]
- [24] Hawke R S, Duerre D E, Huebel J G, Klapper H, Steinberg D J, Keeler R N 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 2734
- [25] Nuckolls J, Wood L, Thiessen A, Zimmerman G 1972 *Nature* **239** 139
- [26] Atzeni S, Meyer-ter-Vehn J 2004 *The Physics of Inertial Fusion* (London: Oxford University Press) p148
- [27] Davis J P, Deeney C, Knudson M D, Raymond W L, Timothy D P, David E B 2005 *Phys. Plasmas* **12** 056310
- [28] Swift D C, Kraus R G, Loomis E N, Hicks D G, McNaney J M, Johnson R P 2008 *Phys. Rev. E* **78** 066115
- [29] Li W 2003 *One-Dimensional Nonsteady Flow and Shock Waves* (Beijing: Defense Industry Press) pp36–55 (in Chinese) [李维新 2003 一维不定常流与冲击波 (北京: 国防工业出版社) 第36—55页]
- [30] Ramis R, Schmaltz R, Meyer-ter-Vehn J 1988 *Comp. Phys. Commun.* **49** 475
- [31] Seaman L 1974 *J. Appl. Phys.* **45** 4303
- [32] Rothman S D, Davis J P, Maw J, Robinson C M, Parker K, Palmer J 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 733
- [33] Hayes D 2001 *Bakward Intergration of the Equations of Motion to Correct for Free Surface Perturbations* (Sandia National Laboratories Report) SAND2001-1440
- [34] Rothman S D, Maw J 2006 *J. Phys. IV France* **134** 745
- [35] Reisman D B, Wolfer W G, Elsholz A, Furnish M D 2003 *J. Appl. Phys.* **93** 8952
- [36] Davis J P 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 103512
- [37] Kerley G I 1987 *Int. J. Impact Eng.* **5** 441
- [38] Smith R F, Eggert J H, Jankowski A, Celliers P M, Edwards M J, Gupta Y M, Asay J R, Collins G W 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 065701

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

Xue Quan-Xi^{1)2)†} Jiang Shao-En¹⁾ Wang Zhe-Bin¹⁾ Wang Feng¹⁾ Zhao Xue-Qing²⁾
Yi Ai-Ping²⁾ Ding Yong-Kun¹⁾ Liu Jing-Ru²⁾

1) (Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China)

2) (State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

(Received 29 September 2017; revised manuscript received 7 December 2017)

Abstract

The equation of state for solid at extreme pressure and relatively low temperature is an important topic in the study of astrophysics and fundamental physics of condensed matter. Direct laser-driven quasi-isentropic compression is a powerful method to achieve such extreme states which have been developed in recent years. A lot of researches have been done in Research Center of Laser Fusion in China since 2012, which are introduced in this article. The researches include an analytical isentropic compression model, a developed characteristic method, techniques for target manufacture, and experiments performed on SHENGUANG III prototype laser facility. The analytical isentropic compression model for condensed matter is obtained based on hydrodynamic equations and a Murnaghan-form state equation. Using the analytical model, important parameters, such as maximum shockless region width, material properties, pressure pulse profile, and pressure pulse duration can be properly allocated or chosen, which is convenient for experimental estimation and design. The characteristic method is developed based on a Murnaghan-form isentropic equation and characteristics, which can be used for experimental design, simulation, and experimental data processing. Based on the above researches, several rounds of experiments have been performed to obtain better isentropic effect by upgrading the target configurations. Five kinds of target configurations have been used up to now, which are three-step aluminum target, CH-coated planar aluminum target, CH-coated three-step aluminum target, planar aluminum target with Au blocking layer, and three-step aluminum target with Au blocking layer. The rear surface of three-step aluminum target is found to be destroyed when the loading pressure rises up to 194 GPa, and weak shock appears in CH-coated planar aluminum target and CH-coated three-step aluminum target. Besides, velocity interferometer system for any reflector (VISAR) fingers are found to decrease when the pressure rises up to about 400 GPa and disappears at 645 GPa. By reducing laser intensity, the whole interface velocities on three steps are obtained in the CH-coated three-step aluminum target and a stress-density curve is calculated. In order to eliminate the weak shock, the target configurations are upgraded by changing the ablation layer and putting a gold blocking layer after it. The experimental results show that the weak shock is eliminated and much clearer VISAR fingers are obtained when pressure rises to as high as 570 GPa.

Keywords: quasi-isentropic compression, characteristics, high pressure physics, temporal-shaped laser

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

DOI: 10.7498/aps.67.20172159

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11475154, 11305156), Science Challenge Project (Grant No. TZ2016001), and the Foundation of key Laboratory of China (Grant No. SKLLIM1606).

† Corresponding author. E-mail: quanxixue@163.com