

基于神光 III 原型的整形激光直接驱动准等熵压缩实验研究

王峰 彭晓世 薛全喜 徐涛 魏惠月

Quasi-isentropic experiment based on Shen Guang-III prototype laser facility with laser direct drive illumination

Wang Feng Peng Xiao-Shi Xue Quan-Xi Xu Tao Wei Hui-Yue

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 085202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.085202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.085202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玻璃微球内氘结晶行为研究

Crystallization behaviors of deuterium in glass microsphere

物理学报.2015, 64(1): 015202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.015202>

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 原型装置的激光加载条件下准等熵压缩实验研究进展

Experimental progress of quasi-isentropic compression under drive condition of Shen Guang-III prototype laser facility

物理学报.2014, 63(18): 185202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.185202>

小收缩比内爆实验初步研究

Experimental studies of low-convergence-ratio implosions

物理学报.2014, 63(12): 125211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125211>

针对神光 II 升级装置的直接驱动快点火集成实验靶的初步设计

Preliminary target design for integrated direct-drive fast ignition experiments on Shenguang-II upgrade facility

物理学报.2014, 63(12): 125205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.125205>

基于神光III原型的整形激光直接驱动准等熵压缩实验研究*

王峰[†] 彭晓世 薛全喜 徐涛 魏惠月

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

(2014年9月28日收到; 2014年11月24日收到修改稿)

整形激光直接驱动准等熵压缩实验技术对新材料科学、冲击波物理、地球物理学研究等领域有重要意义. 设计特定的实验条件, 可以将材料压缩到冲击压缩和等熵压缩都无法达到的状态, 从而为材料研究提供新的技术途径. 介绍了在神光III原型装置上开展的直接驱动准等熵压缩实验, 对理论基础、实验靶型、实验结果、关键技术、实验特点和数据都进行了较详细的分析. 通过实验和相应的数据处理程序, 获得了加载面上压力超过400 GPa的数据, 这是目前国际上用激光直接驱动的方式获得的Al材料中最高压力. 同时, 对经过LiF窗口获得的表观粒子速度与真实粒子速度的关系进行了分析, 获得了一条对表观粒子速度进行动态修正的曲线, 从而使粒子速度的计算更加准确. 对实验的改进方向进行了比较明确的分析. 所提供的数据和分析过程对该领域的研究人员有一定的参考价值.

关键词: 冲击波, 直接驱动, 准等熵, 干涉仪

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

DOI: 10.7498/aps.64.085202

1 引言

用实验技术研究强冲击作用下材料的状态, 对于新材料科学、冲击波物理、地球物理学研究等领域都有重要的意义^[1-5]. 由于冲击压缩的熵增和温升比较大, 所以材料压缩过程只能沿着冲击 Hugoniot 线变化. 真正意义上的等熵压缩线也是惟一的, 所以材料沿着真正的等熵压缩线的状态变化过程也是确定的. 准等熵压缩线是介于冲击绝热线和理想等熵绝热线之间的一条过程曲线, 可提供介于冲击 Hugoniot 线和等熵压缩线之间的状态. 即使从同一个初态开始, 由于压缩路线的不同, 对物质状态的改变也不同, 从而可为研究材料提供新的研究方法. 利用已有的大型激光装置, 例如神光系列装置, 研究激光驱动下的准等熵压缩技术是近年来刚刚兴起的一个研究方向. 与此相关的驱动器

技术、理论模型、靶型、数据处理方法等都是该领域需要研究而且正在不断完善的内容^[1-8]. 同时, 由于激光烧蚀产生冲击压缩的过程有提供高压和高应变率的潜力, 而且激光波形可以用一定的技术精密控制, 所以这种激光驱动准等熵压缩的实验技术在高能量密度物理等研究领域有着广阔的应用前景.

目前, 准等熵压缩的方法包括阻抗梯度飞片加载^[5]、真空腔爆轰加载^[6]、磁压加载^[7]以及近期实现的激光加载等^[8]方法. 激光加载的优点是压强高、应变率高、效率高、样品尺寸小. 但缺点是存在对样品的预热影响, 样品制作困难, 实验条件要求高. 本文介绍了在神光III原型装置上开展的直接驱动准等熵压缩实验, 对理论基础、实验靶型、实验结果、关键技术、实验特点和数据都进行了较详细的分析; 对实验的改进方向进行了比较明确的分析; 从而为该领域的研究人员提供参考.

* 中国工程物理研究院科学技术发展基金(批准号: 2011B0102020)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: xiaozei7566@163.com

2 实验关键技术分析

2.1 加载波形确定

整形激光直接驱动准等熵压缩实验的关键技术主要有激光波形设计、靶设计与加工、激光束匀滑与整形输出控制三个方面。

在准等熵压缩实验中, 压力波以压缩波形式传播. 传播过程的基本物理图像为: 波头速度小于波尾, 随着传播距离的增加, 波头和波尾间距逐渐减小, 当波头、波尾以及中间部分完全重合即形成冲击波. 若材料足够厚, 则压缩波传输一段距离后在其中某处会形成冲击波. 由以上分析可知, 若要使材料压缩效率最高, 所有时间点产生的压力波扰动需同时汇聚于冲击波产生处. 根据这个基本的物理过程, 从状态方程出发, 可以比较明确地获得需要进行准等熵压缩的激光功率波形为^[9]

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

其中, ρ_0 和 c_0 分别是常态下的密度和声速; γ 是一个与熵有关的常数; t 是需要确认的压缩冲击波出现的时刻; t_0 是激光脉冲的宽度. 最大的等熵压缩区厚度为 $c_0 t_0$.

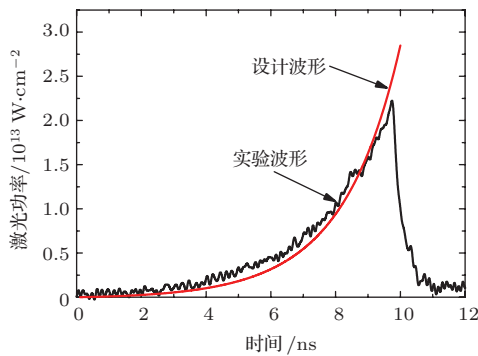


图1 设计的激光波形与实际产生激光波形的比较
Fig. 1. Comparison of design and experimental laser shape.

由于是激光直接烧蚀, 所以需要加入激光烧蚀的定标率

$$p \text{ (Mbar)} = 0.40 I_L^{2/3} \lambda_L^{-2/3} (A/2Z)^{1/3} \text{ [10,11]},$$

其中, I_L 的单位是 TW/cm^2 , A 是质量参数, Z 是原子数, $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$. 将上面两个式子联立, 可以获得理想状态下的激光直接烧蚀强度分布:

$$I_L = 4.16 (A/2Z)^{-1/2} \lambda_L^{3/2} c_0^3 \gamma^{-3/2}$$

$$\times 10^{-3} \left[\left(1 - t/t_0 \right)^{-2\gamma/(\gamma+1)} - 1 \right]^{3/2}. \quad (2)$$

在神光III原型的实验中, 我们选择 t 为 10 ns, t_0 为 8 ns, 材料选择为 Al, c_0 为^[10] 5.328 km/s, ρ_0 为 $2.7 \text{ g}/\text{cm}^3$, γ 选择 3.505. 图1是设计波形与实际波形的比较. 可以看到, 实际波形与设计波形在 0—6 ns 的初始阶段有较大的区别, 这也给后续的实验带来了影响.

2.2 靶设计与加工

图2是激光直接驱动打靶示意图, 靶的尺寸如图2(b)所示. 多层复合靶 CH(C8H8)/Al/LiF 为方形, 边长为 $1000 \mu\text{m}$. 通过蒸镀工艺获得的 Al 基底厚度为 $20 \mu\text{m}$, 三台阶数据分别是 $20 \mu\text{m}/30 \mu\text{m}/40 \mu\text{m}$, 分别表示为图2(b)中的 part1, part2 和 part3, 其中 Al/LiF 样品上 part2 部分的宽度为 $100 \mu\text{m}$. Al 与 LiF 的阻抗非常接近, 所以可以认为实验获得的 Al-LiF 界面速度就代表了 LiF 材料中的粒子速度. 如果需要更精细的分析, 则需要引入两者阻抗的细微差别. 在本实验中, 解决了 Al-LiF 的无胶粘合问题. 由于传统冲击波样品一般比较大, 所以 Al 和 LiF 之间用厚度约 $1 \mu\text{m}$ 的胶粘合不会带来很大的问题. 但是在激光装置的实验中, 所有的靶都很小, 厚度 $1 \mu\text{m}$ 左右的胶也会对压力波的传输带来额外的影响, 所以最好采用无胶粘合的方式. 本文利用蒸镀、研磨工艺已经解决了这个问题, 并且可以根据实验需求获得一系列需要的样品, 从而保证了实验的顺利进行.

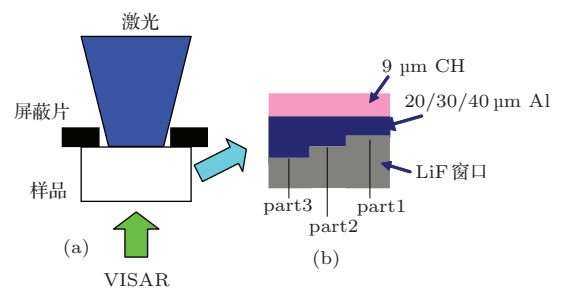


图2 (a) 整形激光驱动准等熵压缩实验布局; (b) 靶示意图
Fig. 2. (a) Schematic of quasi-isentropic compression experiment; (b) diagram of experimental target.

图2中 CH 薄膜的厚度为 $10 \mu\text{m}$. 选择 CH 材料的原因是保证在烧蚀过程中, 中低能的 X 射线不会对 LiF 产生明显的“致盲”效应^[12,13]. 但是, CH 材料的使用同时带来了 CH-Al 材料阻抗不匹配的问题, 从而会在实验中产生多次冲击, 对实验信

号的判读带来一定的影响. 这些在本文后续的压力-时间分布图部分会有分析. 同时, 在本文介绍的初期实验中, 为了验证整个技术路线和暴露关键技术问题, 抓主要矛盾, CH材料与Al材料阻抗不匹配带来的问题在理论激光波形设计时暂时忽略.

2.3 激光整形与束匀滑技术

大型激光装置的束匀滑技术和精密整形能力是本实验能否顺利开展的另一关键问题. 目前并没有大量关于激光直接驱动的准等熵实验的报道. 初步分析, 激光器方面的原因有三个: 第一, 激光光斑需要有一个比较大的平整区域, 以达到对材料均匀压缩的目的; 第二, 激光器需要输出能够精密整形的激光波形, 以获得准等熵压缩的压缩波; 第三, 激光器要能够输出足够的能量, 为物质压缩提供驱动源. 但是, 之前国内的激光器还不具备这三方面的能力, 所以没有开展类似的实验. 现有神光III原型已具有8路激光束匀滑的能力, 单路具有1000 J/351 nm的输出能力, 其平整区超过500 μm , 可以为准等熵压缩实验提供很好的驱动源. 另外, 神光III原型已具有比较精密的任意激光波形输出能力, 每个调控时间单元为100 ps, 可以为本实验提供精密、可控的整形激光, 从而保证了该实验的顺利开展.

实验采用单端驱动加连续相位板匀滑的方式, 将两束激光照射到靶上, 总能量为1000 J, 焦斑平整区直径超过500 μm . 长脉冲整形激光照射到靶上后通过烧蚀过程产生逐渐加强的压缩波. 在Al中产生的压缩波经过Al/LiF界面后, 驱动界面运动, 就可以被成像型速度干涉仪(VISAR)系统^[12-14]记录下整个界面上冲击压缩、追赶的过程. 由于Al与LiF材料的阻抗非常接近, 可以将界面速度等效为粒子速度. 该实验主要诊断设备是成像型VISAR系统.

3 数据模拟与实验结果分析

在实验之前, 需要对实验的基本物理过程进行比较全面的分析, 从而了解主要的物理过程. 激光波形使用实际的激光波形(图1中黑线部分的波形), 靶CH/Al/LiF厚度的基本参数为10 μm /30 μm /80 μm , 状态方程选择Multi-1D程序自带的数据库. 将实际激光波形代入Multi-1D程序中, 可以获得一维模型下压力、密度、温度的分布

图. 为了更清晰地研究压力波的时空分布, 选择使用压力-时间分布图来分析准等熵压缩的过程. 为了更清晰地分析激光波形变化过程中的压力历史, 采用质量坐标进行分析.

图3是CH/Al/LiF中的压力波分布图, 这里使用质量坐标是为了更清晰地反映各层材料中压力的变化. 首先, 由于激光脉冲有一个初始的强度分布, 所以, 在Al/LiF界面上大约5 ns时会观察到第一次冲击(弱冲击). 之后, 由于CH材料与Al材料的阻抗不匹配, 会产生多次反射和冲击, 从而在Al/LiF界面上观察到了“一次冲击”、“二次冲击”以及“峰值”这样的压力变化区. 表现在实际实验中, 会在这些时刻出现多个粒子速度的跳变. 而这些跳变都不是激光波形起伏引起的, 而是烧蚀材料阻抗不匹配带入的. 如果后续实验能够改善阻抗不匹配的问题, 实验中获得的粒子速度历程数据应该会非常光滑.

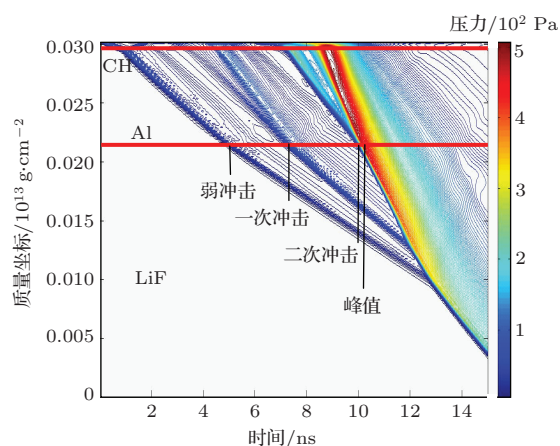


图3 使用Multi-1D程序获得的CH/Al/LiF材料中的压力分布图. CH材料中压缩波的多次反射对LiF中压力波分布的影响非常明显

Fig. 3. Pressure distribution in CH/Al/LiF target with Multi-1D program. The multi reflections of compression wave in CH material cause the obvious effect on the pressure distribution in LiF window.

图4(a)是获得的整形激光驱动准等熵压缩实验数据. 可以看到数据质量非常不好, 尤其是几个台阶脉冲加速阶段, 信噪比非常差. 但是, 我们使用自主开发的数据处理算法可以获得如图4(b)所示的清晰的数据. 可以看到三个台阶获得的加速、减速过程都比较清晰. 而且, part1部分的弱冲击现象也比较明显. 这些都与我们对准等熵加载物理过程的分析比较一致. 但是, 仅仅从图4(b)上很难看到数据中由于多个冲击引起的多个起伏. 将

图4(b)的数据提取出来,可以对物理过程进行细致分析.

图5是三个台阶上的粒子速度曲线.由于波后压缩区引起的折射率修正问题在本文的分析部分有较详细的讨论,这里我们使用了一个随速度范围变动的折射率修正因子,以达到尽量准确获得粒子速度的目的.

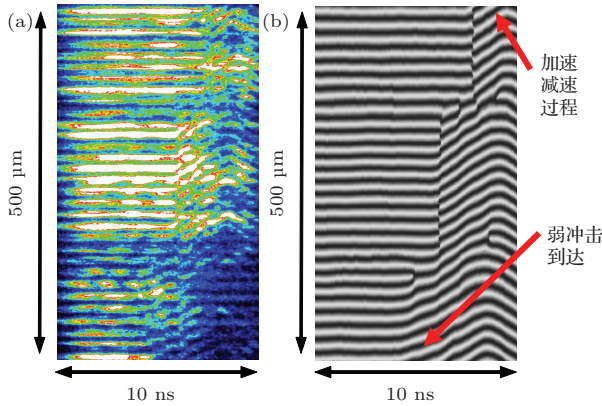


图4 整形激光驱动准等熵压缩实验结果 (a)原始三台阶实验数据;(b)经过处理后的三台阶实验数据

Fig. 4. Experimental results of quasi-isentropic compression with shaped pulse laser: (a) raw experimental data with three steps target; (b) processed experimental data with three steps target.

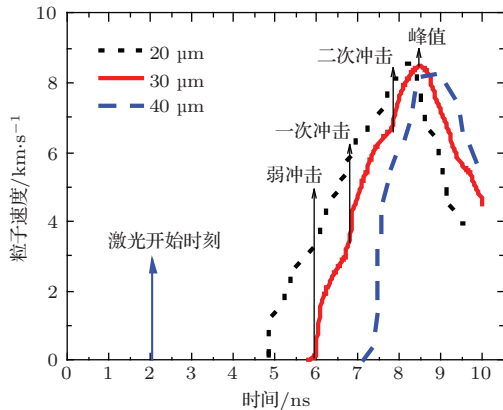


图5 对图4的实验数据进行处理后得到的三台阶粒子速度曲线

Fig. 5. Particle velocity curves of three steps target after processing the experimental data in Fig. 4.

仔细对比图3和图5,可以发现有很多物理过程都是有对应的.例如,Al/LiF界面上会观察到第一次冲击(弱冲击).之后,由于CH材料与Al材料的阻抗不匹配,会产生多次反射和冲击,从而在Al/LiF界面上观察到了“一次冲击”、“二次冲击”以及“峰值”这样的压力变化区.理论分析与实验现象的一致性也说明了数据分析的正确性.

将三个台阶的数据用迭代拉格朗日法^[15,16]处理以后,获得了如图6所示的压力图.可以看到加载面的最高压力已经超过400 GPa.这个数据是目前用Al材料获得的最高压力.通过与Sesame数据^[17,18]的比较,可以发现激光驱动压缩的路径在冲击压缩和等熵压缩线之间,符合准等熵压缩的趋势,证明了激光直接驱动的技术路线的可行性.图6中的误差棒表示速度测量的不确定性引入的变化范围.

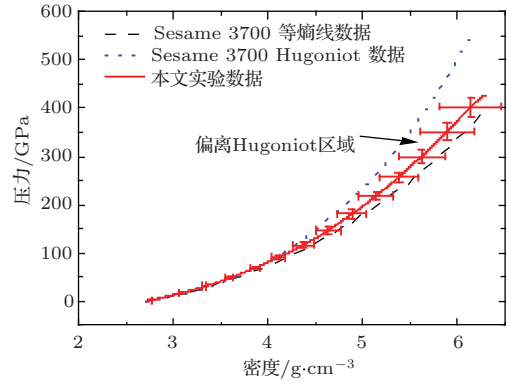


图6 对图4和图5的实验结果进行处理后获得的Al材料中压力图.实验数据与用Sesame 3700获得的等熵线更加接近

Fig. 6. The pressure data in Al material after processing the experimental data in Fig. 4 and Fig. 5. The experimental data is very close to the isentropic curve with Sesame 3700 data base.

4 分析与讨论

4.1 波形偏移带来的影响

在实验中,激光波形总会与理论设计值有一定的偏差,分析激光波形偏差对实验结果的影响就显得非常重要.从物理过程来看,激光波形的变化对应的是压力波波形的变化.根据文献^[19]的计算,只要时间选择合适,冲击波产生的位置 x_s 都会小于理论计算的数据.因而,波形的偏差会导致冲击波产生的位置提前.所以,为了实验有余量,需要对这方面的数据进行提前预估.

4.2 折射率修正系数的讨论

在所有的准等熵压缩相关的实验中,非常基础的数据是粒子速度.如果这个数据不准确,其整个后续数据的分析就失去了存在的意义.一般认为Al/LiF的阻抗匹配非常好,所以其界面速度就可以代表粒子速度.但是,在这类实验中,粒子界面是

在冲击波阵面之后,所以探针光需要先穿过冲击波阵面后才能到达粒子界面.因此采用多普勒测速技术,探针光的频率必然受到波后区域的影响,其折射率修正系数就是一个不可回避的问题.

使用文献[20]的数据,表观速度与真实速度的公式为

$$U_a = a_0 + a_1(U_t - \beta) + a_2(U_t - \gamma_1)(U_t - \gamma_2), \quad (3)$$

其中, U_a 和 U_t 分别表示表观速度和真实速度, $a_0 = 3.0634$ km/s, $a_1 = 1.2751 \pm 0.0082$, $a_2 = (0.0008 \pm 0.0015)$ s/km, $\beta = 2.41$ km/s, $\gamma_1 = 0.713$ km/s, $\gamma_2 = 9.53$ km/s. 取中间值,可以得到一个基本可以使用的表观速度与真实速度的关系曲线,如图7所示.

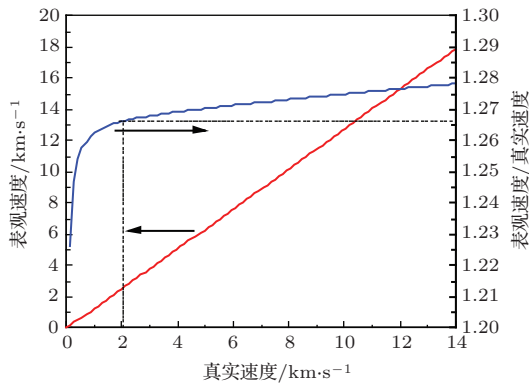


图7 以LiF为窗口条件下表观粒子速度与真实粒子速度的差别与修正系数图

Fig. 7. The dynamic correcting curve between apparent particle velocity and real particle velocity in LiF window.

在图7中,表观粒子速度和真实粒子速度之间的修正系数随着真实速度的不同有一定的变化.在真实粒子速度小于2 km/s的范围,修正系数变化较大.而真实粒子速度达到2 km/s以上时,修正系数在1.266—1.280之间变化.本文的实验选择了一个变动值,同时代入一定的测量不确定度.我们认为,在相当大的一个压力范围内(小于800 GPa)[20],这样的数据处理方式是合适的.

5 结 论

本文对神光III原型装置上开展的激光直接驱动准等熵压缩实验进行了比较全面的分析,研究了激光波形设计、靶设计与加工以及激光波形控制技术.同时,对这三个影响实验成败的关键技术进

行了分析.利用Multi-1D程序,将真实的激光波形代入靶参数模型中,用质量坐标分析了CH/Al/LiF三层靶材料中压力随时间的分布.理论分析发现,由于低密度CH材料的存在,会导致LiF材料中观察到多个冲击,而这些冲击并不是材料研究需要的,应该尽量避免.通过与实验波形的对比,验证了理论分析的正确性.实验获得了比较清晰的条纹图,通过数据处理程序获得了完整的冲击加速、减速全过程的数据.利用迭代拉格朗日法获得了加载面上压力随时间变化的数据,最高压力超过400 GPa.由于实验测量的是表观速度,与真实速度存在一定偏差.利用文献[20]的数据,完成了表观速度-真实速度曲线对应关系的分析.在真实的数据处理中,这个关系对数据校正起了很重要的作用.

总之,激光直接驱动准等熵实验在国内处于刚刚起步的状态,可以参考的实验和分析并不多.本文把在神光III原型上完成的激光直接驱动准等熵实验比较完整地进行了分析,将对该领域的研究人员有比较重要的借鉴意义.

参考文献

- [1] Munro D H, Celliers P M, Collins G W, Gold D M, Da Silva L B, Haan S W, Cauble R C, Hammel B A, Hsing W W 2001 *Phys. Plasmas* **8** 2245
- [2] 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
- [3] Lorenz K T, Edwards M J, Jankowski A F, Pollaine S M, Smith R F, Remington B A 2006 *High Energ. Dens. Phys.* **2** 113
- [4] Jia G, Xiong J, Dong J Q, Xie Z Y, Wu J 2012 *Chin. Phys. B* **21** 095202
- [5] Shen Q, Luo G Q, Zhang L M, Huang H J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1538 (in Chinese) [沈强, 罗国强, 张联盟, 黄海军 2007 物理学报 **56** 1538]
- [6] Jin K, Li P, Wu Q, Jin X G 2004 *Explo. Shock Waves* **24** 419 (in Chinese) [金柯, 李平, 吴强, 金孝刚 2004 爆炸与冲击 **24** 419]
- [7] Gui Y L, Liu C L, Wang Y P, Sun C W 2005 *Detonation Shock Waves* **25** 183 (in Chinese) [桂毓林, 刘仓理, 王彦平, 孙承伟 2005 爆轰波与冲击波 **25** 183]
- [8] 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
- [9] Harlow F H, Amsden A A 1971 *Los Alamos Scientific Laboratory Report No. LA-4700*

- [10] Li W X 2003 *One-Dimensional Nonsteady Flow and Shock Waves* (Beijing: Defense Industry Press) (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)]
- [11] Lindl J 1995 *Phys. Plasmas* **2** 3933
- [12] Wang F, Peng X S, Liu S Y, Li Y S, Jiang X H, Ding Y K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 025202 (in Chinese) [王峰, 彭晓世, 刘慎业, 李永升, 蒋小华, 丁永坤 2011 物理学报 **60** 025202]
- [13] Wang F, Peng X S, Liu S Y, Jiang X H, Xu T, Ding Y K, Zhang B H 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 115203 (in Chinese) [王峰, 彭晓世, 刘慎业, 蒋小华, 徐涛, 丁永坤, 张保汉 2011 物理学报 **60** 115203]
- [14] Celliers P M, Bradley D K, Collins G W, Hicks D G, Boehly T R, Armstrong W J 2004 *Rev. Sci. Instrum.* **75** 4916
- [15] Rothman S D, Davis J P, Maw J, Robinson C M, Parker K, Palmer J 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **38** 733
- [16] Rothman S D, Maw J 2006 *J. Phys. IV France* **134** 745
- [17] Kerley G I 1987 *Int. J. Impact Eng.* **5** 441
- [18] Johnson J D 1994 *Los Alamos Scientific Laboratory Report* No. LA-UR-94-1451
- [19] Xue Q X 2014 *Ph. D. Dissertation* (Mianyang: China Academic Engineering of Physics) (in Chinese) [薛全喜 2014 博士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [20] Fratanduono D E, Boehly T R, Barrios M A, Meyerhofer D D, Eggert J H, Smith R F, Hicks D G, Celliers P M, Braun D G, Collins G W 2011 *J. Appl. Phys.* **109** 123521

Quasi-isentropic experiment based on Shen Guang-III prototype laser facility with laser direct drive illumination*

Wang Feng[†] Peng Xiao-Shi Xue Quan-Xi Xu Tao Wei Hui-Yue

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

(Received 28 September 2014; revised manuscript received 24 November 2014)

Abstract

Quasi-isentropic compression technique is very useful for new material, shock wave physics, and earth physics. With shaping pulse laser, the quasi-isentropic compression technique is provided. For the designed experimental condition, the high energy density of shaping lasers can be used to generate shockless loading on the solid material to reach a high compression rate state with low temperature, which cannot be obtained with shock compression and isentropic compression technique. Then a new way to study the material can be provided. In this paper, the isentropic compression experiment with laser direct-drive illumination based on Shen Guang-III prototype laser facility is conducted. The theoretical model, target designing, experimental results, key technique, experimental characteristics and experimental data are analyzed in detail. The compression pressure above 400 GPa on the loading surface is obtained with experimental data and processing program, which is the highest pressure achieved to date. After comparing the apparent particle velocity with the true particle velocity, the dynamic correction curve can be obtained to achieve the real particle velocity, which is more accurate. The improving direction is provided, which will provide the important information. The experimental data and design will give the valuable reference for the study in this field.

Keywords: shock wave, direct-drive, isentropic, interferometer

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

DOI: 10.7498/aps.64.085202

* Project supported by the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 2011B0102020).

[†] Corresponding author. E-mail: xiaozei7566@163.com