

# 基于神光 III 原型的激光直接驱动自由面准等熵实验研究

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, 四川 绵阳 621900

**摘要** 长脉冲激光打靶的直接驱动方式效率较高,但对激光强度变化非常敏感。利用测量自由面速度历史的方法对激光直接驱动准等熵压缩实验技术进行了分析,为改进激光直接驱动的准等熵压缩实验技术提供技术基础。介绍了国内在神光 III 原型装置上首次开展的激光直接驱动自由面准等熵压缩实验。对实验靶型、激光波形、典型实验结果以及实验中的关键技术进行了分析。在激光能量为 1000 J 的实验中,使用成像型速度干涉仪获得了较为理想的准等熵压缩条纹图。实验发现,自由面速度达到 11.3 km/s 时,自由面反射的探针光信号消失。通过对比 Multi-1D 软件的理论模拟数据与实验处理的结果,发现由于 Al 自由面缺少约束,这类实验会造成波系复杂化的问题,但是对主冲击的研究还是有意义的。对某些特殊材料,在很难找到阻抗匹配窗口的条件下,利用激光直接驱动方式研究材料高压响应特性提供了另一条可实施的技术途径。

**关键词** 激光器;冲击波;准等熵;干涉仪;自由面

中图分类号 TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0212007

## Quasi-Isentropic Compression Experiment with Free Surface in Laser Direct-Drive Condition Based on Shenguang-III Laser Prototype

Wang Feng Peng Xiaoshi Xue Quanxi Xu Tao Wei Huiyue

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

**Abstract** Laser indirect-drive has the potential to get ultra-high pressure which is very useful for shock physics. The isentropic compression experiment with long pulse in laser direct-drive is very sensitive to the laser intensity variation. The important technique for isentropic compression experiment with long pulse in laser direct-drive has been introduced with the diagnosis of free surface velocity. The improvement way can be obtained from the experimental data. The target, experimental data and the important technique can be analyzed. The full velocity history of free surface can be achieved after design and control the laser pulse with the comparison of experiment data under 1000 J laser energy. The signal of free surface disappears when the free surface velocity reaches 11.3 km/s. After comparing the simulation data with Multi-1D program and experimental result, the complex of shock wave system in Al sample has been shown because there is no confinement on the free surface. However, this technology is useful to study the main shock wave in the sample. When the sample with transparent window is difficult to manufacture, these experimental data show the technology for the further development of isentropic compression experiment with long pulse in laser direct-drive.

**Key words** lasers; shock wave; quasi-isentropic; interferometer; free surface

**OCIS codes** 120.7250;120.5475;120.5050

## 1 引 言

随着高能量密度物理研究的推进,激光加载驱动方式下高压物理的研究逐渐引起国内研究者的注意。激光驱动产生冲击波的主要方式有间接驱动和直接驱动两种。间接驱动方式中的冲击波主要来自于激光

收稿日期: 2014-09-02; 收到修改稿日期: 2014-10-26

基金项目: 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2011B0102020)

作者简介: 王 峰(1975—),男,博士,副研究员,主要从事激光 ICF 中冲击波物理相关实验方面的研究。

E-mail: xiaozei7566@163.com

与黑腔作用产生的 X 射线对材料的烧蚀过程。这种方式与气炮的加载方式有很大的区别。在激光加载间接驱动条件下,能够产生比气炮加载更高的压力<sup>[1-4]</sup>。这为开展超高压条件下的冲击波物理研究开辟了新的研究领域。直接驱动是直接利用激光对材料的烧蚀过程产生冲击波,其能量利用更加直接,因而对激光脉冲能量的波动也就更加敏感。等熵压缩能够使样品从初态连续变化到终态,其应力增量是以当地声速传播的,这就为研究材料的动态响应提供了非常好的过程数据。实际上,理想的等熵压缩过程是不存在的,只能做到近似等熵和准等熵。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,它与理论等熵线越接近,其等熵性就越好。就加载方式而言,准等熵压缩的加载方法主要包括阻抗梯度飞片加载<sup>[5]</sup>、真空腔爆轰加载<sup>[6]</sup>、磁压加载<sup>[7]</sup>以及近期实现的激光加载<sup>[8]</sup>等方法。

近年来,激光直接驱动产生准等熵压缩的方式受到越来越多的重视,主要原因有两个方面。第一,这种驱动方式的效率比较高。由于是激光直接驱动,所以激光能量大部分都用来产生冲击波而没有中间过程的损失。第二,采用这种驱动方式产生的压力会更高。气库靶的驱动方式能够产生的压力受限于其驱动方式,只能达到 200 GPa 或再高一点<sup>[9]</sup>。本文以 Al 为样品材料,通过介绍在神光 III 原型上进行的激光直接驱动准等熵压缩的实验,验证直接驱动准等熵压缩研究的技术路线,分析实验结果与关键影响因素,从而为该技术的发展提供一个比较明确的研究起点。

## 2 实验布局

图 1 是激光直接驱动打靶示意图。其主要诊断设备是成像型任意反射面速变干涉仪(VISAR)<sup>[10-12]</sup>,波长为 532 nm 的探针光照射到样品上。Al 基底厚度为 20 mm,三台阶数据分别是 20/30/40 mm。这个厚度的设计是为了满足准等熵压缩中多个台阶数据的观测。实验中打靶激光采用单端驱动加连续相位板(CPP)匀滑的方式,将两束激光照射到靶上。激光波长为 351 nm,两束激光共 1000 J 能量,焦斑大小为  $\phi 2$  mm。采用 CPP 匀滑的方式主要是为了减小激光光斑中的高频成分,从而降低激光直接驱动中超热电子对靶材料的影响。长脉冲整形激光照射到靶上后产生逐渐加强的压缩波。在 Al 中产生的压缩波经过 Al 台阶后,就可以被成像型 VISAR 系统记录下后界面压缩、追赶、飞散以及消失的整个过程。成像型 VISAR 系统的空间分辨达到 5 mm,可以提供很小尺度上自由面碎片的速度信息。

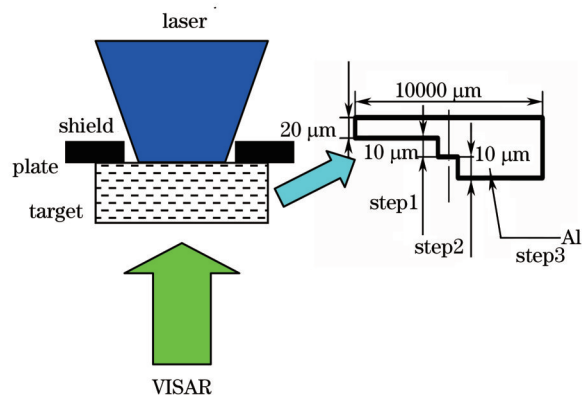


图 1 直接驱动准等熵压缩实验布局

Fig.1 Schematic of laser drive quasi-isentropic experiment

就准等熵加载实验方法自身而言,希望有一个连续、平滑的加载过程,从而可以使材料的压缩线按照一个可以预期的状态变化。如果存在激光能量强度的初始干扰,那么长脉冲直接驱动自由面准等熵压缩实验将很难进行优化和控制,所以需要进行激光脉冲的精密控制,同时尝试用较低的激光能量获得尽量好的准等熵压缩数据。因而进行了优化激光脉冲后的激光直接驱动自由面准等熵压缩实验。设计波形基本按照指数形式变化,具体可参照文献[13]。理想状态下,激光直接烧蚀样品的强度分布为

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

式中  $I_L$  的单位是  $\text{TW}/\text{cm}^2$ ,  $A$  是质量参数,  $Z$  是原子数,  $\lambda_L$  为激光波长。在神光 III 原型的实验中, 选择  $t$  为  $10 \text{ ns}$ ,  $t_0$  为  $8 \text{ ns}$ , 材料选择为  $\text{Al}$ ,  $c_0$  为  $5.328 \text{ km/s}$ ,  $\rho_0$  为  $2.70 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,  $\gamma$  选择  $3.505$ 。通过(1)式可以获得激光波形的数据。图2是改进激光波形后设计波形与实际波形的对比图, 其中蓝线  $083 N_1+S_1$  是黑线  $083 N_1$  与红线  $083 S_1$  合成的激光波形。实验中使用两路激光, 可以产生与设计波形<sup>[13]</sup>比较一致的准等熵压缩波形。从图2可以看到, 激光波形与实验设计非常接近, 预期可以获得比较好的实验结果。

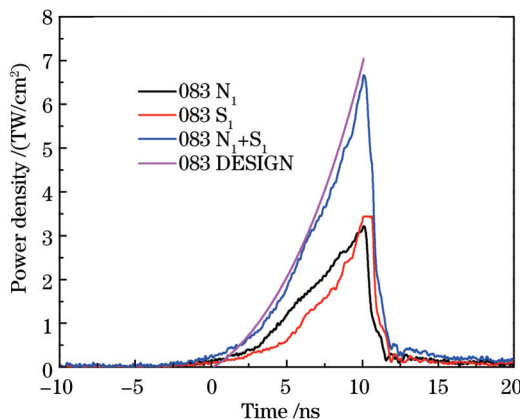


图2 改进后的激光波形

Fig.2 Improved laser pulse

将图1和图2的实验设置输入模拟软件 Multi-1D 中, 可以对实验结果进行预估和分析。图3是模拟分析的  $30 \text{ mm}$  厚  $\text{Al}$  材料中的压力分布。纵轴是质量坐标, 横轴是时间, 反映的是特定位置的材料在不同时刻的压力分布。从图3可以看到自由面实验几个方面的问题。第一, 由于激光直接烧蚀材料, 所以激光脉冲上很小的起伏就会造成后续冲击的出现。虽然图2中的实际波形起始波形非常缓, 但是仍然可以在图3看到起始脉冲造成的强度变化, 如图3中 part1 部分所示。第二, 在  $4 \text{ ns}$  左右, 激光脉冲的斜率有一个轻微的增加, 这主要是激光器输出能力造成的。而这个斜率变化也会引起一个附带的冲击, 如图3中 part2 部分所示。第三, 由于自由面后面缺少约束, 所以存在多次的冲击反射以及与后续冲击的相互作用现象。这些现象从客观上将物理现象复杂化了, 如图3中 part3 所示。第四, 主冲击在整个物理图像中还是非常明显的。因而还可以用于材料特性的研究, 如图3中 part4 所示。

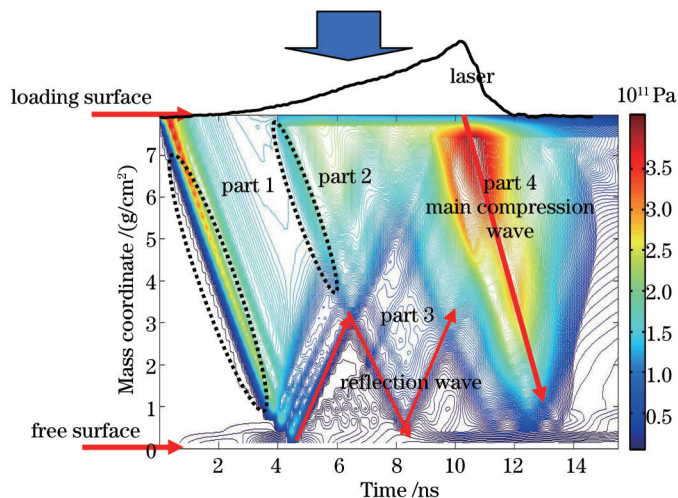


图3 使用 Multi-1D 模拟分析的激光直接加载  $30 \text{ mm}$  厚  $\text{Al}$  材料中的压力分布

Fig.3 Pressure distribution in  $30 \text{ mm}$  thick  $\text{Al}$  from the simulation results with Multi-1D software

### 3 实验结果

图4是准等熵压缩获得的成像型 VISAR 数据, 三台阶厚度是  $20/30/40 \text{ mm}$ 。采用激光直接驱动的方式,

成像型 VISAR 直接诊断三台阶后自由面的速度信息。通过三台阶自由面速度历程的变化分析准等熵压缩的效果。从图 4 看到,三个台阶在压缩波到达后都产生了条纹的连续上升。第一个台阶产生的条纹有一个比较明显的冲击。而第二个台阶产生的条纹信号就比较连续。第三个台阶的条纹信号又出现了一个明显的跳变。说明在 40 mm 的厚度上就已经可以产生明显的冲击压缩了。

图 5 是对图 4 方框部分处理后的条纹图。可以看到,条纹图比较连续而且其连续增长状态也比较明显。由于后界面存在对压缩波的稀疏与反射,所以出现了多次的弯曲。从实验效果看,图 5 的条纹图连续,没有出现明显的冲击和条纹跳变,基本上符合准等熵压缩实验结果的特征。

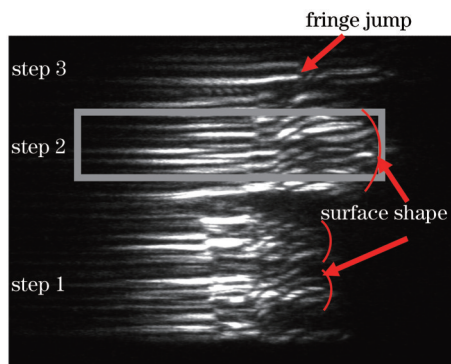


图 4 改进激光波形后的实验结果

Fig.4 Experimental data with improved laser pulse

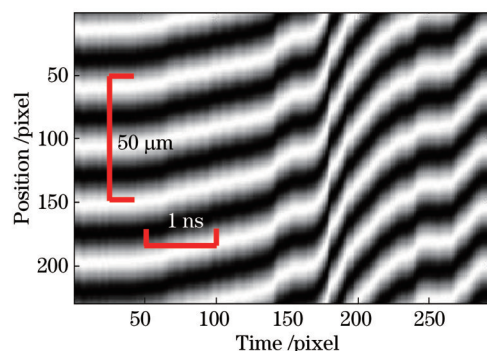


图 5 图 4 中方框部分条纹图的处理结果

Fig.5 Processing result of the block diagram in Fig.4

图 6 是把图 4 处理后得到的速度曲线<sup>[14-16]</sup>。从第一个台阶后表面获得的速度曲线在 3.2 ns 处仍然存在一个冲击,在 11 km/s 的位置出现了熔化和飞散。从第二个台阶后表面获得的速度曲线比较光滑,没有明显的冲击信号出现,说明第二个台阶的厚度比较合适。从第三个台阶后表面获得的速度曲线在 6 ns 左右出现了一个速度台阶,而后出现一个较快的速度增长,说明后半程压缩波的追赶状态偏离了预先的设计。在第二个台阶的数据中,图 3 中 part1 部分的影响主要是产生一个从静态开始增长的缓变速度台阶,part3 的影响体现在产生了一个小的速度跳变台阶上,而 part4 的影响最大,将后表面的速度加速到 11 km/s 左右。对比 step1 和 step3 在速度接近 11 km/s 时的速度曲线后,可以判断 step2 上最后接近 11km/s 的速度曲线上产生的速度平台区是数据信号处理上带来的问题,而不是物理问题。通过图 6 可以看到,适当设计激光波形,仅用 1000 J 左右的能量就可以将 Al 自由面的速度加速到 11 km/s。这个数据为后续该实验的改进提供了很好的实验设计起点。

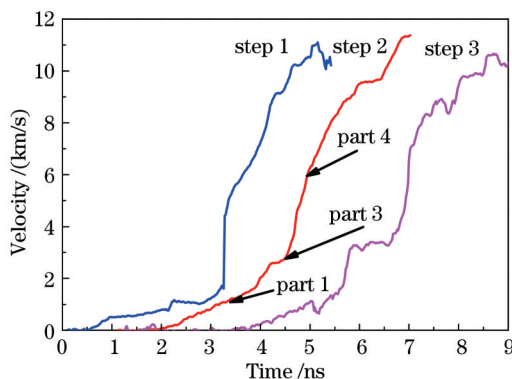


图 6 图 4 中三台阶速度处理结果

Fig.6 Velocity curve of three steps processed from Fig.4

将图 4 中 Al 台阶 step 2 的反射率与图 5 中对应的速度曲线进行分析,得到图 7。可以发现随着后界面速度的增加,准等熵压缩状态下的反射率逐渐降低到 60% 左右。这也说明后界面的温度在逐渐升高,直至速度达到 11.3 km/s 时后界面温度升高到 Al 材料的熔点,而导致探针光信号被大量吸收而后消失。文献[17-18]的数据表明,只要表面不破碎,即使接近熔点,也有可探测的信号。在文献[18]中,综合图 8 和图 11,可以看到即使



第三个台阶的温度达到Al的熔点,由于材料表面仍然是完整的,在实验中依旧可以获得20%左右的反射率。所以,step 2上条纹信号消失应该主要是Al后表面破碎造成的结果。

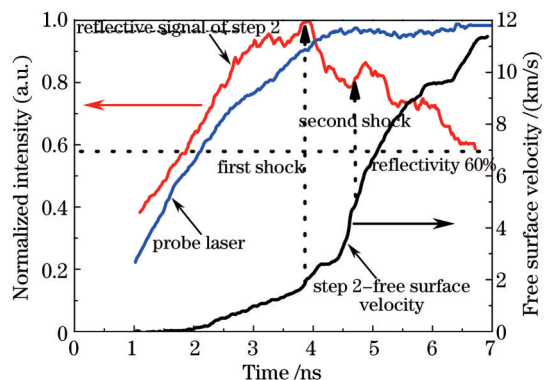


图7 对台阶2的反射率和自由面速度对比分析的数据

Fig.7 Comparison of reflectivity and free surface velocity from step 2

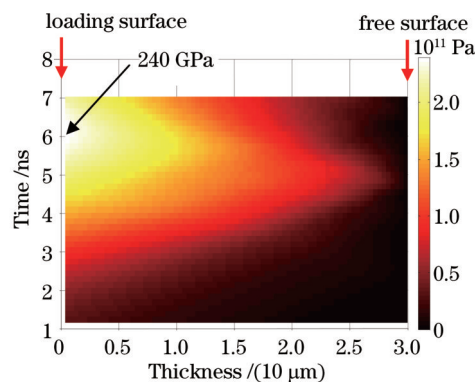


图8 利用反积分的数据处理方式获得的30 mm厚样品中压力分布图

Fig.8 Pressure distribution in 30 mm thick step with backward integration method

将台阶2的数据利用反积分的方式<sup>[19]</sup>进行处理后得到了图8的压力分布图。可以看到,在加载面上,压力最高达到240 GPa,而自由面附近压力很低。沿着时间方向,压力逐渐向自由面传递。在自由面上,压力为零,而加载面上的压力很高。对比图8和图3可以看到,仅仅从条纹图只能得到最大的激光压缩造成的材料中压力的分布,整体形状与理论模拟图3的part4部分一致。但是,由于在用反积分法处理过程对条纹跳动存在滤波和去噪问题,而这个滤波和去噪过程又有可能会将后表面的反射波信号忽略,所以,最终的实验结果只能得到一个比较纯粹的材料中的压力分布。

## 4 结 论

在实际的冲击波物理实验中,常用的透明窗口材料有石英、LiF、蓝宝石等有限的几种,从而导致按照阻抗匹配的观点设计实验受到晶体选择上的限制,所以真正能够开展的加窗冲击波物理实验是比较有限的。这种条件下,用检测自由面的方式进行材料特性研究就成为一个可能的选择。本文介绍了在神光III原型上开展的激光直接驱动准等熵压缩实验布局、激光波形、关键技术和实验结果,其探测量为自由面速度变化历史。实验发现,激光强度的变化、自由面的无约束特点都会造成材料压缩波系的复杂化。从而在自由面速度曲线上呈现多次速度跳变的现象。而主压缩脉冲对材料的压缩非常明显,所以仍然可以用于材料特性的研究。实验发现在1000 J能量驱动下,准等熵压缩效果较好的条件下,Al自由面的飞散不会很严重,最高的自由面速度能达到11.3 km/s。根据自由面速度与粒子速度关系分析的数据<sup>[20]</sup>,其粒子速度略小于自由面速度的一半,其粒子速度接近5.1 km/s。通过计算,加载面的压力接近240 GPa。这个数据说明激光加载在高压物理领域具有很好的生命力,可以比较轻易地达到较高的加载。

总的来说,由于是首次在神光III原型装置上开展这个实验,所以控制激光波形的经验不足,导致VISAR测量图像的信噪比不够理想。通过程序模拟证实,实验结果中的冲击成分主要来自于激光波形实际值与设计值的偏离。这也为后续开展类似实验指明了改进的方向。本实验的顺利开展为后续利用长脉冲直接驱动方式进行准等熵压缩实验技术的研究奠定了良好的技术基础。

## 参 考 文 献

- 1 D H Munro, P M Celliers, G W Collins, *et al.*. Shock timing technique for national ignition facility [J]. Phys Plasmas, 2001, 8(5): 2245-2250.
- 2 T R Boehly, E Vianello, J E Miller, *et al.*. Shock-timing experiments using double-pulse laser irradiation [J]. Phys Plasmas, 2006, 13(5): 056303.
- 3 D G Hicks, P M Celliers, G W Collins, *et al.*. Shock-induced transformation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and LiF into semiconducting liquids [J]. Phys

- Rev Lett, 2003, 91(3): 035502.
- 4 J Edwards, K T Lorenz, B A Remington. Laser-driven plasma loader for shockless compression and acceleration of samples in solid state [J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(7): 075002.
- 5 Shen Qiang, Wang Chuanbin, Zhang Lianmeng, *et al.*. A study on generating quasi-isentropic compression via graded impedance flyer [J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(8): 1759-1763.  
沈 强, 王传彬, 张联盟, 等. 为实现准等熵压缩的波阻抗梯度飞片的实验研究[J]. 物理学报, 2002, 51(8): 1759-1763.
- 6 Jin Ke, Li Ping, Wu Qiang, *et al.*. Numerical simulation on acceleration process of flyer driven by detonation product through an air cushion [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(5): 419-424.  
金 柯, 李 平, 吴 强, 等. 爆轰产物驱动飞片运动数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(5): 419-424.
- 7 Zhao Jianheng, Sun Chengwei, Tan Fuli, *et al.*. Launch technique for isentropic compression flyer plates magnetically driven by using fast pulsed power [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4): 303-308.  
赵剑衡, 孙承伟, 谭福利, 等. 一维平面磁驱动等熵加载发射飞片技术[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4): 303-308.
- 8 R F Smith, J H Eggert, A Jankowski, *et al.*. Stiff response of aluminum under ultrafast shockless compression to 110 GPA [J]. Phys Rev Lett, 2007, 98(6): 065701.
- 9 K T Lorenz, M J Edwards, A F Jankowski, *et al.*. High pressure, quasi-isentropic compression experiments on the Omega laser [J]. High Energ Dens Phys, 2006, 2(3-4): 113-125.
- 10 P M Celliers, D K Bradley, G W Collins, *et al.*. Line-imaging velocimeter for shock diagnostics at the Omega laser facility [J]. Rev Sci Instrum, 2004, 75(11): 4916-4929.
- 11 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Liu Shenye, *et al.*. Active high-accurate shock-wave measure technique in laser indirect-drive experiment [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1114004.  
王 峰, 彭晓世, 刘慎业, 等. 辐射驱动下主动式高精度冲击波速度精密诊断技术[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1114004.
- 12 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Mei Lusheng, *et al.*. Shock timing experiment based on imaging velocity interferometer system for any reflector [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 31(13): 135201.  
王 峰, 彭晓世, 梅鲁生, 等. 基于速度干涉仪的冲击波精密调速实验技术研究[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 135201.
- 13 Quanxi Xue, Zhebin Wang, Shaoen Jiang, *et al.*. laser-direct-driven quasi-isentropic experiments on aluminum [J]. Phys Plasmas, 2014, 21(7): 072709.
- 14 Zhong Min, Chen Wenjing, Su Xianyu, *et al.*. Study of the measurement range of S-transform profilometry [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(10): 1012004.  
钟 敏, 陈文静, 苏显渝, 等. S变换轮廓术测量范围的研究[J]. 光学学报, 2013, 33(10): 1012004.
- 15 Zhang Min, Tang Feng, Wang Xiangzhao, *et al.*. Phase retrieval errors analysis of interferogram using two dimensional fast Fourier transform method [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308001.  
张 敏, 唐 锋, 王向朝, 等. 二维快速傅里叶变换干涉图相位提取误差分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308002.
- 16 Li Xue, Zhang Qican. Inverse fringe generation method based on pruning optimization algorithm [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1212003.  
李 雪, 张启灿. 基于剪枝优化算法的反向条纹生成方法[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1212003.
- 17 A Benuzzi, M Koenig, B Faral, *et al.*. Preheating study by reflectivity measurements in laser-driven shocks [J]. Phys Plasmas, 1998, 5(6): 2410-2420.
- 18 Wang Feng, Peng Xiaoshi, Shan Lianqiang, *et al.*. Experimental progress of quasi-isentropic compression under drive condition of Shen Guang-III prototype laser facility [J]. Acta Physica sinica, 2014, 63(18): 185202.  
王 峰, 彭晓世, 单连强, 等. 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[J]. 物理学报, 2014, 63(18): 185202.
- 19 Zhang Hongping, Sun Chengwei, Li Mu, *et al.*. Backward integration method in data processing of quasi-isentropic compression experiment [J]. Chinese J Theoretical and Applied Mechanics, 2011, 43(11): 105-111.  
张红平, 孙承伟, 李 牧, 等. 准等熵实验数据处理的反积分方法研究[J]. 力学学报, 2011, 43(11): 105-111.
- 20 Luo Shengnian, Han Libo, Xie Yun, *et al.*. The relation between shock-state particle velocity and free surface velocity: a molecular dynamic study on single crystal Cu and silica glass [J]. J Appl Phys, 2008, 103(9): 093530.

栏目编辑: 何卓铭