

文章编号: 1001-4322(2003)06-0570-05

利用“神光- II”激光装置多路光束叠加直接驱动下的冲击波平面性及稳定性*

傅思祖, 黄秀光, 吴江, 马民勋, 何钜华, 叶君健, 顾援

(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: 利用“神光- II”的 3 路基频光输出及小透镜列阵束匀滑技术, 通过优化设计和合理地选择光路组合, 实现了多路叠加斜入射的驱动激光, 在靶材料中产生一个 650~750 μm 范围内平面性良好的冲击波, 有效地提高了“神光- II”输出光束的利用率。同时, 利用斜面靶进行的冲击稳定性实验表明, 在靶面功率密度分别为 3.26×10^{14} 及 $2.56 \times 10^{14} \text{W/cm}^2$ 时, 冲击波至少在 28.38~55.82 和 22.13~35.07 μm 的 Al 样品厚度内是稳定传播的。

关键词: 冲击波; 平面性; 稳定性; 状态方程; 列阵透镜; 斜面靶

中图分类号: O439; O414.12

文献标识码: A

材料在高温高密度状态下的热力学特性即材料的高压状态方程, 既是一门独立的学科分支, 同时, 又在诸如天体物理、地球物理、材料研究、惯性约束聚变(ICF)研究等自然科学和工程技术中有着广泛的应用。利用高功率激光作驱动源辐照固体靶材, 可在靶材料中产生强冲击波, 并使材料在极短时间(ns 量级)内达到高温高压的冲击压缩状态, 从而提供了一种良好的实验室研究材料高压状态方程的途径。由于强激光驱动可使材料达到常规化爆和气炮驱动无法企及的超高压(近 TPa)状态, 因此, 随着高功率激光器的不断完善和发展, 激光驱动冲击波已成为材料超高压状态方程实验研究的主要手段之一^[1~11]。

由于状态方程的实验研究主要是测量强激波到达自由面后卸载时的冲击发光信号并将由此推算出的冲击波速度作为材料状态方程测量的特征物理量, 因此, 只有在样品材料中形成的冲击波具有良好的平面性并在一定的厚度范围内保持稳定传播, 才能使最终测量到的冲击压缩数据准确可靠。本文介绍了利用“神光- II”多路激光叠加直接驱动 Al 材料靶情况下的冲击波平面性及传播稳定性。

1 多路激光叠加直接驱动下的冲击波平面性

由于通常的激光驱动源在焦面上形成的是一个斑径约百 μm , 空间强度呈高斯分布的光斑, 因此不能产生平面冲击波, 对于复杂的靶结构也难有好的空间分辨, 致使实验数据无法采集, 实验结果难以做到准确, 因此需要对输出激光进行空间整形改造。在“神光”系列激光装置上, 有一个针对单束激光设计的特殊的列阵组合透镜和非球面主透镜的复合聚焦系统^[12,13], 它能使输出激光在焦面上形成一个六角形焦斑, 并使得含 90% 输出总能量的光强在此六角形焦斑的空间尺度内呈均匀分布, 从而解决了单束激光正入射情况下的冲击波平面性问题。但“神光- II”现有的单路激光输出能力难以实现在中 Z 材料中达到百万 MPa 以上的压力目标, 为了追求材料的更高压力, 根据冲击波压强 p 与驱动激光功率密度 I 的关系 $p = \alpha I^\beta$ (通常 $\alpha \approx 0.6$, $\beta \approx 0.7$)^[1], 增加驱动激光强度是最为直接有效的, 因此, 必须尽可能地利用“神光- II”的多路激光联合驱动。

根据“神光- II”现有的光路排布, 利用其末级输出的多路激光联合辐照靶样品必然会形成若干光束相对于样品表面非正入射的情况, 而“神光- II”所采用的列阵组合透镜和非球面主透镜复合系统的单路束匀化技术最终形成的光强均匀分布的焦斑是垂直于入射光束光轴的, 故多束激光叠加后在焦斑(靶面)上所形成的光强分布有可能是非均匀的, 从而不能形成良好的平面冲击波并导致无法进行状态方程实验的准确测量。因此, 如何在既能采用“神光- II”现仅有的较成熟的列阵镜束匀化技术的同时, 又能尽量提高“神光- II”输出激光的能量利用率(即利用其多路激光), 需要有一个优化设计的方案。

* 收稿日期: 2002-11-04; 修订日期: 2003-03-03

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 傅思祖(1965), 男, 博士生, 副研, 主要从事激光等离子体物理研究; 上海 800-229 信箱; E-mail: fusz@mail.sh.cn.ac.cn.

针对“神光- II”靶场光路系统和靶室上激光入射窗口的分布情况,并考虑到大角度斜入射情况下能量的吸收效率较之于正入射情况有明显下降等因素,决定采用“神光- II”的第6,7,8三束激光自上而下从北面经3个分离的靶室窗口同时入射到靶(T)样品(靶面垂直于联单 X 轴)上,这样保证了一路(Beam No. 7)是正入射的。图1给出了实验排布示意图,其中,用于对靶背冲击发光信号成像放大的光学系统OIS的放大倍率为17,空间分辨率为 $1.5\mu\text{m}$ 。

在图1中,3束激光(No. 6, 7, 8)光轴均处于 OXY 平面内,第6,8两路的光轴与 X 轴的夹角均为 42° 。每路驱动激光分别经小透镜列阵和主透镜聚焦后在靶面位置形成一个与各自光轴垂直、光强均匀分布的六角形焦斑,所形成的3个焦斑是不完全重叠的,而是分别落在3个相交的平面内,3个焦斑平面的交线为 OZ 轴,显然,在焦斑相叠的三维空间内光强沿 Z 轴方向始终是均匀分布的。同时,由于激光经汇聚后在焦点处具有一定的焦深长度(指在此长度内焦斑上的光强分布基本保持不变),对如图1所示“神光- II”所采用的小透镜列阵和非球面主透镜复合聚焦系统而言,其焦深长度约为 $50\mu\text{m}$ 。图2给出了 OXY 平面内3束激光在焦深范围内叠加的示意图,显然,图2中给出的沿 X 轴对称的阴影五边形部分是3束激光相叠后依然保持光强均匀分布的区域,而且沿 Z 方向光斑有效尺度内的任意一个 XY 剖面内都有一个类似的光强均匀分布区域。考虑到光束6和8以 42° 的角度入射,故图2中 $\Delta Y = 27.46\mu\text{m}$, $\Delta Y' = 37.16\mu\text{m}$ 。这样,3束激光叠加以后,以 O 为对称中心, Z 方向在原设计的焦斑尺寸、 X 和 Y 方向在图2所示的阴影五边形包含的空间尺度范围内,光强是均匀分布的。

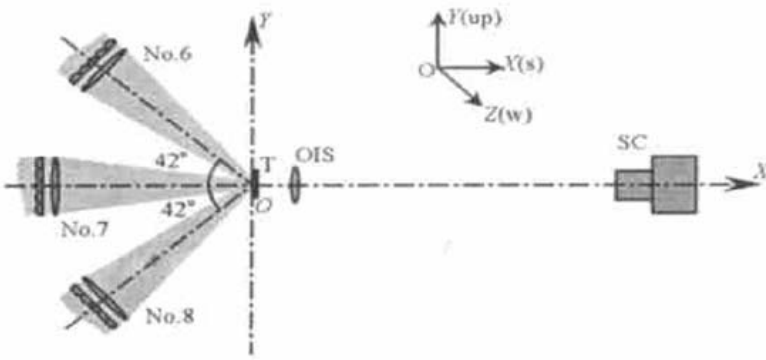


Fig. 1 Experimental set up. T, OIS and SC are target, optical imaging system and streak camera, respectively

图1 实验排布图。其中T, OIS和SC分别为靶、光学成像系统和条纹相机

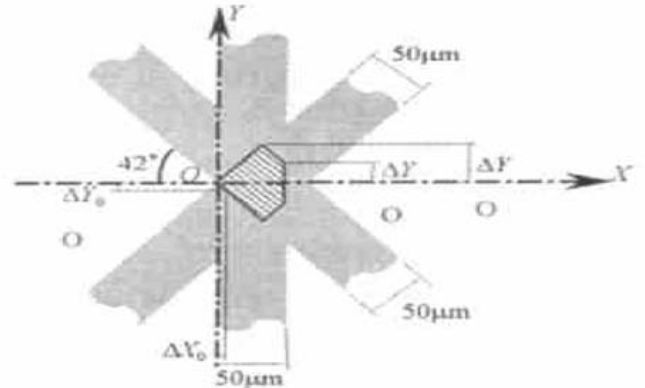


Fig. 2 Diagram of the beams accumulated in the region of the focal depth

图2 3束激光在焦深范围内叠加示意图

在图1所示的实验排布图中,用于诊断测量靶背二维平面(YZ 平面)上冲击发光图像的可见光条纹相机SC,其接收信号的狭缝是沿着 Z 轴方向放置在 OXZ 平面内的,显然,沿狭缝长度方向所对应的驱动激光强度是均匀分布的。同时,由于在通常的实验中相机狭缝沿 Y 轴方向的宽度一般设置在 $50\mu\text{m}$ 左右,考虑到冲击发光信号是在经过了放大倍数约17的光学系统OIS后成像到相机狭缝上的,因此,在狭缝宽度范围内,实验记录到的靶背冲击发光信号所对应的在靶面焦斑处沿 Y 轴方向的尺度约为 $2\Delta Y_0 = 2.94\mu\text{m}$,其在 X 轴方向所对应的 $\Delta X_0 = 1.63\mu\text{m}$,显然,实验时只要将垂直于 X 轴的靶面位置调整到 $1.63 \sim 50\mu\text{m}$ 的尺度内(参见图2),利用如上所述的叠加方式驱动,是可以形成一个均匀辐照区域并获得相应的平面冲击波的,而且不影响实验测量。

冲击波平面性实验在“神光- II”装置上进行。首先,针对“神光- II”单路出射光束近场光强特殊分布(有大面积光强为0的区域)的情况,对小透镜列阵及主聚焦透镜组合系统进行了优化设计^[16],实现了单路激光的靶面大光斑均匀辐照,最终形成长(Z 方向)、短(Y 方向)轴分别为约 $900\mu\text{m}$ 和 $630\mu\text{m}$ 的六角形均匀焦斑。其次,多路叠加实验利用了“神光- II”的第6,7,8三路基频输出(如图1所示),每路能量约 600J ,脉宽约 1ns 。图3给出了条纹相机SC记录到的针对不同驱动方式下的靶背冲击发光图像,(a)为单路(No. 7)正入射驱动 $30\mu\text{m}$ 的Al平面靶;(b)为单路(No. 8)斜入射驱动 $20\mu\text{m}$ 的Al平面靶;(c)为2路(No. 6, 8)斜入射叠加驱动基底和台阶厚度分别为20和 $10\mu\text{m}$ 的Al单台阶靶;(d)为3路(No. 6, 7, 8)叠加驱动基底和台阶厚度分别为20和 $10\mu\text{m}$ 的Al单台阶靶。图3中,沿 Z 方向的标尺长度是指靶上的平面冲击波区域,沿 t 方向给出的是条纹相机的扫描时间标尺,其中图3(c),(d)上所标的时间尺度同时也表示了冲击波渡越相应Al台阶厚度的时间。

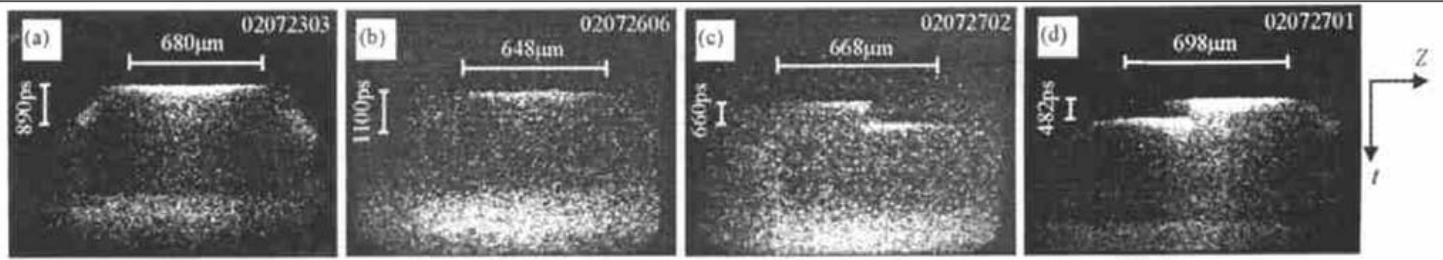


Fig. 3 Experimental results of the shock planarity

图3 冲击平面性实验结果

在图3(a), (b), (c), (d)所给出的靶背冲击发光信号图像中,其发光前沿的平整度即反映了冲击波平面性,显然,多路叠加实验也获得了与单路正入射实验相当的良好平面冲击波。对测量结果的分析表明,发光前沿平整度起伏沿着时间扫描(t)方向所引起的时间涨落约为 $\Delta t = \pm 6.9\text{ps}$ 。以图3(c), (d)为例,在不同的靶面功率密度情况下,冲击波在 $10\mu\text{m}$ 厚的Al台阶中的渡越时间 t 为 $660\sim 482\text{ps}$,故冲击波平面性(发光前沿平整度)所引起的渡越时间的相对测量误差约为 $|\Delta t/t| = (1.05\sim 1.43)\%$,这在激光状态方程实验测量中是允许的。当然,通过适当增加台阶厚度,还可以进一步减小相对误差。

同时,测量表明具有良好平面性的发光区域为 $650\sim 700\mu\text{m}$,比均匀辐照的焦斑设计值(Z 方向的长轴尺度)约 $900\mu\text{m}$ 要小,这是由于冲击波在样品厚度内传播过程中的二维(YZ 平面)边侧稀疏所造成的^[17],显然,稀疏的尺度与靶面功率密度及靶厚度有关。

2 多路激光叠加直接驱动下的冲击波传播稳定性

目前激光状态方程实验中主要测量的特征物理量是冲击波速度 D ,它是通过实验前对样品台阶厚度 d 的测量和实验中对冲击波渡越该厚度台阶样品所需时间 t 的测量而给出的,即

$$D = d/t \quad (1)$$

显然,(1)式所给出的冲击波速度 D 是一个平均速度,而状态方程中真正意义上的冲击波速度是指材料在某一特定状态下的瞬时速度,但由于实验上要测量瞬时速度是极其困难的,因而迄今为止在实验上都是利用平面靶或台阶靶所给出的冲击波平均传播速度的测量值来代替瞬时速度^[1~7],这就要求在进行平均速度测量的范围内,冲击波速度是恒定不变的,或者说冲击波是稳定传播的。通常情况下,高功率激光在样品材料中驱动的冲击波在传播过程中有一个增长、稳定和衰减的过程^[6],因此,冲击波传播稳定性的研究可以归结为在相应实验条件下如何判别冲击波是稳定传播的以及如何获得冲击波在样品材料中稳定传播的厚度区域的问题。

实验利用“神光-II”输出的脉宽均为约 1ns 的3路基频激光辐照到一个厚度连续变化的Al斜面靶上,如图4所示。通过同时测量冲击波在渡越了不同厚度样品以后的靶背冲击发光信号,直观地给出相应厚度范围内冲击波传播规律。图4中 X_0 的选择只要使靶面位置落在上文中所述的 $1.63\sim 50\mu\text{m}$ 的尺度内即可。

图5给出了实验测量到的Al斜面靶背冲击发光信号图像。其中,以 O 为分界,沿2个方向 OZ 和 OZ' 的相应空间分别对应于平面基底部分和斜面部分的靶背发光信号,(a)和(b)对应于表1所列的不同实验条件。利用光学成像系统OIS所给出的空间对应关系和尺度定标值,以及表1中所列的初始靶样品测量结果 θ ,可以得到发光图像上沿空间方向(Z 方向)任意一点所对应的靶样品厚度 d ,显然,在空间(等效于厚度空间)随时间线性变化的冲击发光前沿所对应的区域内冲击波是稳定传播的。假设以厚度为 d_0 的基底背面发光为时间零点,就可以读出冲击波渡越不同样品厚度 d 所对应的相对时间 t 。

表1 初始靶测量参数

Table 1 Experimental conditions

| | $d_0/\mu\text{m}$ | $\theta/(\circ)$ | power density on target surface/ $(\text{W}\cdot\text{cm}^{-2})$ |
|-----|-------------------|------------------|--|
| (a) | 10 | 10.04 | 3.26×10^{14} |
| (b) | 6 | 4.92 | 2.56×10^{14} |

图6所示的 $d-t$ 关系给出了对实验图像(图5)的处理结果,显然,线性部分(图6中的实心数据点)的斜率即为冲击波速度 D 。计算结果表明在靶面功率密度分别为 $3.26 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 及 $2.56 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 时,至少在Al样品厚度分别为 $28.38\sim 55.82\mu\text{m}$ 和 $22.13\sim 35.07\mu\text{m}$ 的区域中,冲击波是稳定传播的,稳定区内相应的冲

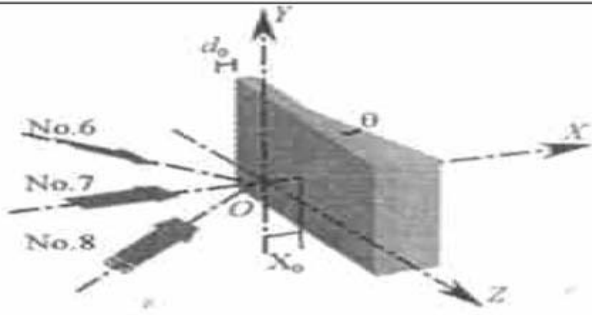


Fig. 4 Inclined-plane target

图4 斜面靶示意图

击波速度 D 分别为 20.10 km/s 和 16.36 km/s, 线性拟合的相关系数 R 分别为 0.996 和 0.991, 由线性拟合方差给出的冲击波速度 D 的误差 ΔD 分别为 ± 0.03 和 ± 0.08 km/s。需要指出的是, 由于图中(a), (b)所对应的斜面靶劈角 θ 相差了近一倍(见表1), 而驱动激光焦斑尺寸及条纹相机时间扫描是相对固定的, 故对图6(b)所对应的劈角较小的斜面靶, 其厚度测量范围就会相应减小, 因此, 实验所获得的冲击波稳定传播的范围可能只是整个冲击稳定区域的一部分。

3 结束语

材料的高压状态方程是一项应用性很强的基础研究, 因此, 最终给出的实验数据必须准确可靠特别是要具有相当高的精度。利用强激光驱动靶产生的冲击波进行状态方程实验研究, 无论从物理原理上还是从诊断技术方法上而言, 都需要在样品材料中产生一个具有良好平面性并且在一定厚度范围内稳定传播的冲击波。本文所述的在“神光-II”上进行的实验在这两个方面均获得了较为满意的结果, 平面冲击波的获得为在“神光-II”上深入开展真正意义的状态方程的研究提供了必要的保证, 冲击波传播稳定性的研究为各种状态方程靶物理设计提供了可靠的实验依据。

致谢 衷心感谢“神光-II”运行组的同志为本实验顺利进行所付出的辛勤劳动。

参考文献:

- [1] Cottet F, Romain J P. Ultrahigh pressure laser-driven shock-wave experiments at 0.26 μm wavelength[J]. *Phys Rev Lett*, 1984, **52**(21): 1884-1886.
- [2] Ng A, Parfeniuk D, DaSilva L. Hugoniot measurements for laser-generated shock wave in aluminum[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **54**(24): 2604-2607.
- [3] 顾援, 王勇刚, 傅思祖, 等. 实验测定铜在 0.4~0.8 TPa 压力范围内的冲击绝热线[J]. *强激光与粒子束*, 1991, **3**(1): 1-4. (Gu Y, Wang Y G, Fu S Z, et al. Shock adiabat measurements on copper in the pressure range from 0.4 to 0.8 TPa. *High Power Laser and Particle Beams*, 1991, **3**(1): 1-4)
- [4] Bolotin V A, Gavrilov V V, Gol'berg S M, et al. Matter acceleration in laser-irradiated multifoil systems[J]. *Phys Fluids B*, 1992, **4**(8): 2596-2604.
- [5] Cauble R, W. Phillion D, Hoover T J, et al. Demonstration of 0.75 Gbar planar shocks in X-ray driven colliding foils[J]. *Phys Rev Lett*, 1993, **70**(14): 2102-2105.
- [6] Fu S Z, Gu Y, Wu J, et al. Laser-driven shock stability in Al and shock compressibilities of Fe up to 0.8 TPa and SiO₂ up to 0.4 TPa[J]. *Phys Plasmas*, 1995, **2**(9): 3461-3465.
- [7] Koenig M, Faral B, Boudenne J M, et al. Relative consistency of equations of state by laser-driven shock wave[J]. *Phys Rev Lett*, 1995, **74**(12): 2260-2263.
- [8] 傅思祖, 顾援, 吴江, 等. 激光状态方程测量中飞片增压技术的实验研究[J]. *中国科学(A 辑)*, 1995, **25**(3): 331-336. (Fu S Z, Gu Y, Wu J, et al. Experimental research of increasing pressure technique with flyer in the measurement of laser equation of state. *Science in China (Series A)*, 1995, **25**(3): 331-336)

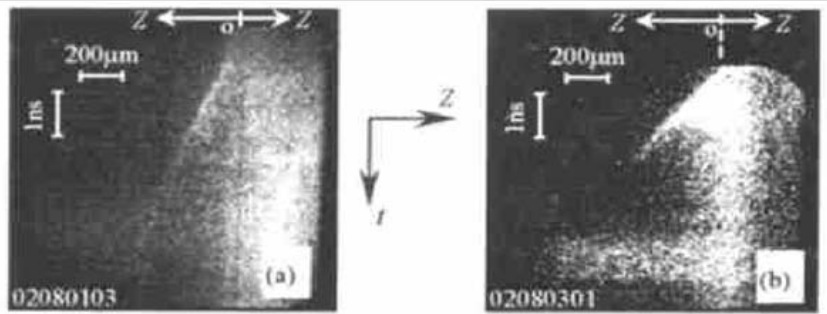


Fig. 5 Shock luminescence from rear surface of inclined-plane target

图5 斜面靶背冲击发光信号

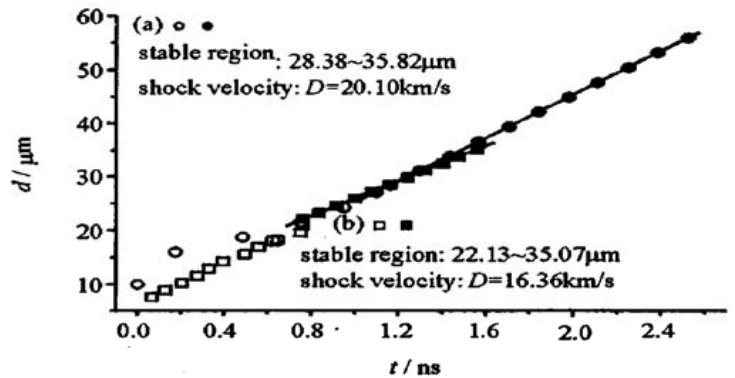


Fig. 6 Experimental results of shock stability

图6 冲击稳定性实验结果

- [9] Collins G W, Celliers P, DaSilva L B, et al. Equation of state measurements of hydrogen isotopes on Nova[J]. *Phys Plasmas*, 1998, **5**(5): 1864–1869.
- [10] Batani D, Balducci A, Beretta D, et al. Equation of state data for gold in the pressure range < 10 Tpa[J]. *Phys Rev B*, 2000, **61**(14): 9287–9294.
- [11] Fu S Z, Gu Y, Huang X G, et al. Experimental investigation of flyer character driven by a laser and increasing pressure with the flyer technique [J]. *Phys Plasmas*, 2002, **9**(8): 3201–3204.
- [12] Deng X M, Liang X C, Chen Z Z, et al. Uniform illumination of large targets using a lens array[J]. *Appl Opt*, 1986, **25**(3): 377–381.
- [13] Gu Y, Fu S Z, Wu J, et al. Equation of state studies at SILP by laser-driven shock wave[J]. *Laser and Particle Beams*, 1996, **14**(2): 157–169.
- [14] Trainor R J, Lee Y T. Analytic models for design of laser-generated shock-wave experiments[J]. *Phys Fluids*, 1982, **25**(10): 1898–1907.
- [15] Loeb A, Eliezer S. An analytical model for creation and decay of strong shock waves caused by a trapezoidal laser pulse[J]. *Phys Fluids*, 1985, **28**(4): 1196–1201.
- [16] 傅思祖, 孙玉琴, 黄秀光, 等. “神光-II”装置靶面均匀辐照系统的优化设计[J]. 中国激光, 2003, **30**(2): 129–133. (Fu S Z, Sun Y Q, Huang X G, et al. Optimizing design for uniform irradiation system on target surface of “Shenguang-II” facility. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, **30**(2): 129–133)
- [17] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 212–214. (Jing F Q. Introduction to experimental equation of state. Beijing: Science Press, 1999. 212–214)

Planarity and stability of shock driven directly by multi-beam laser from “Shenguang-II” laser facility

FU Sī-zu, HUANG Xiū-guang, WU Jiāng, MA Mǐn-xun, HE Jū-hua, YE Jūn-jian, GU Yuan
(Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China)

Abstract: On the basis of the three-beam output of basic frequency from “Shenguang-II” laser facility and beam smoothing technology of lens array, the shock wave with a better planarity in ranged 650~ 750 μm the target was created after optimum design and rational combination for laser beam. Then the efficiency of output beams from “Shenguang-II” laser facility had been raised. And the shock stability experiment with the inclined-plane target indicated that the shock wave steadily propagated in the Al target of thickness of about 28.38~ 55.82 μm and 22.13~ 35.07 μm under the power density of $3.26 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$ and $3.11 \times 10^{14} \text{W}/\text{cm}^2$ respectively.

Key words: Shock wave; Flatness; Stability; Laser equation of state; Lens array; Inclined-plane target