

文章编号: 1001-4322(2007)11-1832-05

# 激光驱动冲击波在铝-金阻抗匹配靶中的传播稳定性\*

黄秀光<sup>1</sup>, 罗平庆<sup>2</sup>, 傅思祖<sup>1</sup>, 舒桦<sup>1</sup>, 龙滔<sup>2</sup>, 吴江<sup>1</sup>,  
叶君建<sup>1</sup>, 何钜华<sup>1</sup>, 马民勋<sup>1</sup>, 顾援<sup>1</sup>

(1. 中国工程物理研究院 上海激光等离子体研究所, 上海 201800; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 针对神光 II 第九路激光条件, 利用 1 维 JB 程序和多台阶靶技术对冲击波在铝-金阻抗匹配靶中的传播稳定性进行了理论和实验研究, 实验结果与理论结果基本吻合。结果表明, 激光驱动冲击波在铝-金阻抗匹配靶中传播时, 高阻抗待测材料金中的冲击波稳定传播最大距离急剧减小。因此, 在进行铝-金阻抗匹配靶物理参数设计时, 应保证高阻抗材料金台阶厚度满足冲击波传播稳定性, 然后再按照阻抗匹配实验中两种材料的冲击波速度比来确定低阻抗标准材料铝的台阶厚度。根据神光 II 第九路激光条件, 铝-金阻抗匹配靶中铝基底厚度选取为 30  $\mu\text{m}$  左右较好, 金台阶和铝台阶厚度应分别小于 10  $\mu\text{m}$  和 17  $\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 阻抗匹配; 冲击波; 稳定性; 数值模拟

**中图分类号:** O347.5; O242.1

**文献标识码:** A

利用激光驱动冲击波进行阻抗匹配实验可以获得材料状态方程(EOS)参数<sup>[1-4]</sup>。根据阻抗匹配原理<sup>[5]</sup>, 需要测量冲击波渡越标准材料和待测材料界面前后的瞬时速度, 而在实验中, 这是很难实现的, 实际测量的是冲击波在标准材料和待测材料台阶中传播的平均速度, 这就要求冲击波在台阶中必须是稳定传播的(或者说是匀速的), 这样才能满足阻抗匹配原理条件, 从而保证 EOS 实验测量数据的准确性和可靠性, 这也是保证 EOS 实验测量数据精度的基本要求之一, 因此, 需要知道激光驱动冲击波在靶中的传播特性, 从而准确地进行阻抗匹配靶物理参数设计。激光驱动冲击波传播稳定性可以利用数值模拟进行研究, 也可以通过楔形靶实验进行研究<sup>[3-4]</sup>。目前已有文献的冲击波稳定性验证实验仅有低阻抗标准材料的楔形靶实验, 数值模拟研究也不够深入, 特别是对标准材料和待测材料阻抗差别较大时缺乏实验和理论模拟研究。为此, 本文根据 EOS 物理实验需求, 针对神光 II 第九路激光条件, 对铝-金阻抗匹配靶实验的冲击波传播稳定性进行了理论数值模拟和实验研究。

## 1 数值模拟结果与讨论

### 1.1 模拟条件

利用 JB 程序进行数值模拟, 它是在 1 维三温流体力学基础上结合了超热电子多群限流和自洽电场的计算程序, 主要研究 1 维情况下考虑超热电子输运的激光打靶规律<sup>[6]</sup>。

**激光参数:** 模拟神光 II 第九路激光打靶条件, 激光波长  $\lambda = 527 \text{ nm}$  ( $2\omega$ ), 激光脉宽  $\tau = 2 \text{ ns}$  (FWHM, 梯形), 前后沿 0.3 ns, 峰值功率密度  $I \leq 1.1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。

**模拟靶型:** 铝平面靶和铝-金阻抗匹配靶。其中铝平面靶厚 120  $\mu\text{m}$ , 初始坐标 0~120  $\mu\text{m}$ , 选取激光入射面为坐标原点。铝-金阻抗匹配靶, 铝基底厚度 20~50  $\mu\text{m}$ , 每 5  $\mu\text{m}$  一种厚度间隔, 共模拟 7 种基底厚度, 金台阶厚度皆取为 25  $\mu\text{m}$ , 选取铝-金界面为坐标原点。

### 1.2 模拟结果与分析

对 120  $\mu\text{m}$  厚的铝平面靶, 分别取  $I = 1.1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  和  $I = 0.88 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  两种激光功率密度进行了模拟。通过冲击波阵面压强随空间坐标(或时间)变化可以比较方便和直观地观察冲击波传播稳定性。图 1 给出了相应于两种激光功率密度时铝平面靶中冲击波阵面压强随靶厚度的变化情况。模拟结果表明, 当  $I = 1.1 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  时, 冲击波阵面在铝靶中传播约 20  $\mu\text{m}$  时开始稳定, 稳定传播最大距离  $L_{\text{Al,max}} \approx 98 \mu\text{m}$ , 然后

\* 收稿日期: 2007-03-22; 修订日期: 2007-08-21

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 黄秀光(1970—), 男, 副研究员, 从事激光状态方程实验研究; huangxiuguang@sohu.com。

冲击波开始衰减,冲击波稳定传播速度  $D \approx 25 \mu\text{m}/\text{ns}$ 。而当  $I = 0.88 \times 10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$  时,冲击波阵面在铝靶中传播约  $15 \mu\text{m}$  时开始稳定,稳定传播最大距离  $L_{\text{Al,max}} \approx 92 \mu\text{m}$ ,然后开始衰减,冲击波稳定传播速度  $D = 23.4 \text{ m}/\text{ns}$ 。解析模型表明激光驱动冲击波稳定传播的距离约为  $2D\tau^{[7]}$ 。我们的数值模拟结果表明,这一粗估公式对单介质材料靶基本适用。

根据铝-金阻抗匹配已有实验报道,或者利用铝、金 EOS 模型进行阻抗匹配模拟估计,发现铝-金阻抗匹配实验中金、铝冲击波速度比满足  $D_{\text{Au}}/D_{\text{Al}} \approx 0.6$ ,这一比值在广泛的冲击波压强范围具有较高的精度。但是,不能简单地认为金属材料中的稳定传播最大距离  $L_{\text{Au,max}} \approx 0.6(L_{\text{Al,max}} - \text{基底厚度})$ ,需要通过铝-金阻抗匹配靶的模拟方能给出正确答案。

我们在上述两种激光功率密度下,选取了 7 种铝基底厚度,分别是  $20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 \mu\text{m}$ ,数值模拟了金属材料中的冲击波传播稳定性。对应这 7 种铝基底厚度,金属材料中冲击波最大稳定传播距离分别为  $11.0, 13.7, 16.3, 19.3, 23.0, 20.0, 19.1 \mu\text{m}$ 。图 2 给出了铝基底厚度分别为  $20, 40$  及  $50 \mu\text{m}$  三种情况下冲击波阵面压强在铝基底和金台阶中的传播曲线。结果表明,随着铝基底厚度的增加,金属材料中冲击波稳定传播距离增加,当铝基底厚度增加到一定大小后,金属材料中冲击波稳定传播距离反而减小,而且冲击波稳定传播距离不满足  $L_{\text{Au,max}} \approx 0.6$  的估算( $L_{\text{Al,max}} - \text{基底厚度}$ )。另外,从图中也可以看出,冲击波从铝基底传播到金台阶时,冲击波压强成倍增加。

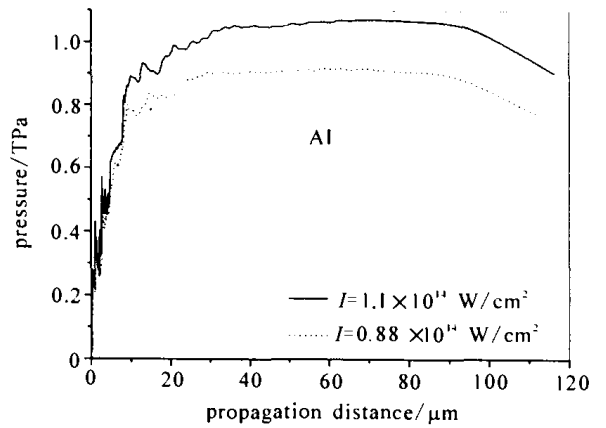


Fig. 1 Shock-front pressure vs propagation distance  
图 1 冲击波阵面压强随传播距离的变化曲线

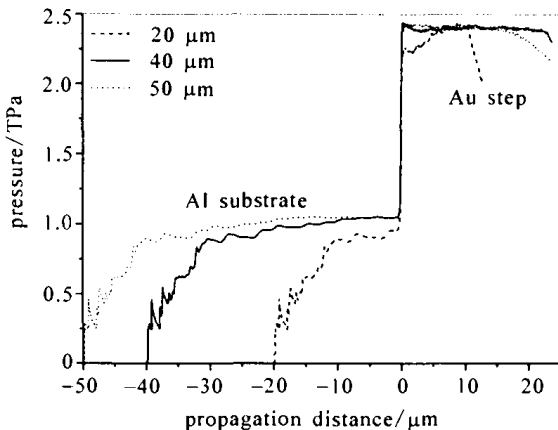


Fig. 2 Shock-front pressure vs propagation distance in Al-Au impedance-matching target

图 2 冲击波阵面压强在铝-金阻抗匹配中随传播距离的变化曲线

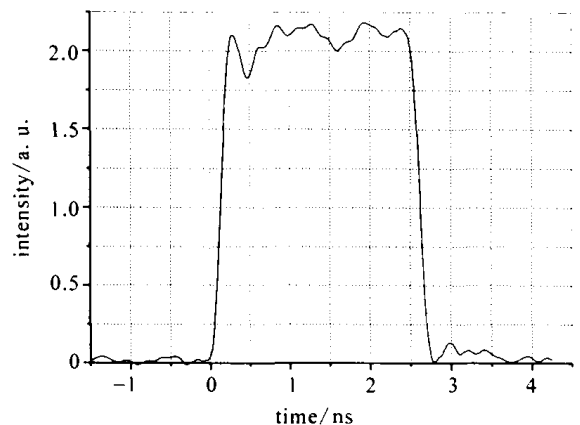


Fig. 3 Typical oscilloscope trace for the  $2\omega$  pulse of the ninth beam of Shenguang-II

图 3 神光 II 第九路倍频激光脉冲波形

我们知道,当入射冲击波传播到铝-金界面时形成透射冲击波和反射冲击波,开始阶段透射冲击波和反射冲击波分别稳定传播,而当反射冲击波到达铝基底左边界时,则与稀疏波迎面相碰,将强化稀疏波作用,并使稀疏波加速向透射冲击波方向传播,当稀疏波赶上透射冲击波时,透射冲击波将发生衰减。正是这一物理过程,成为金中稳定传播区大幅度下降的主要原因。另外,由于反射冲击波产生时刻与迎面稀疏波相碰时刻之间有一定的时间间隔,适当增加铝基底厚度可以相对延迟反射冲击波和稀疏波迎面相碰时间,因而相对延迟了透射冲击波的衰减时间。但如果铝基底厚度过大,则入射冲击波传播到交界面时激光加源停止,靶自由面的稀疏作用因为没有激光加源效应而得到充分展现,从而相应减小了反射冲击波和稀疏波的相碰时间,最终反而减小金中透射冲击波稳定传播的时间和距离。

随着激光功率密度下降,铝基底优化厚度会稍微下降,金中的冲击波稳定传播距离也稍微下降。此外,考虑到流体力学多维效应也会使稳定区长度稍有下降。

鉴于数值模拟过程还有其它不确定因素,靶物理参数设计不能完全用足理论预计结果,应适当留有余地并结合实验验证。

## 2 实验结果与讨论

我们知道,激光直接驱动冲击波的传播特性主要取决于激光脉冲的时间波形,因此,通过对激光波形的时间整形可以控制冲击波的传播特性<sup>[8-9]</sup>。理论上讲,当激光波形为方波或梯形波时,对激光状态方程实验最有利。神光Ⅱ第九路实际输出波形为约 2.2 ns 的近梯形波,平顶部分有一定的起伏(如图 3 所示),为了考察这种激光条件下冲击波在铝和铝-金阻抗匹配靶中的传播情况,我们以铝作基底,分别进行了铝和金四台阶靶实验。多台阶靶结构如图 4 所示,与曾经采用过的斜面靶相比<sup>[3-4]</sup>,它不但可以考察冲击波在单一介质的传播稳定性情况,而且可以考察冲击波在两种不同介质中的传播稳定性情况,更能反映阻抗匹配靶的实际情况。

实验排布如图 5 所示。第九路输出的倍频激光( $2\omega, \lambda=527 \text{ nm}, \tau \approx 2.2 \text{ ns}$ , 能量  $E=400 \sim 2\ 500 \text{ J}$ )经透镜列阵(LA)和非球面主透镜组合聚焦,在靶面形成强度均匀的六角形光斑(长轴宽约  $1\ 200 \mu\text{m}$ , 短轴宽约  $840 \mu\text{m}$ ),从而在靶中产生平面性良好的冲击波。激光辐照靶产生冲击波,当冲击波到达靶背面时,由于冲击加热,靶背面温度很高,可达几千甚至几万 $^{\circ}\text{C}$ ,辐射出很强的可见光,甚至紫外光,靶背面的冲击加热发光信号经组合放大成像镜成像在可见光条纹相机的入射狭缝上,被条纹相机时空分辨记录。为了保护成像镜及条纹相机,在它们前面分别插入保护玻璃片及衰减滤光片。成像镜放大倍数约 11.8,空间分辨率好于  $2 \mu\text{m}$ 。条纹相机的时间分辨率约  $12.0 \text{ ps}$ (对应于  $2 \text{ ns}$  量程档)。

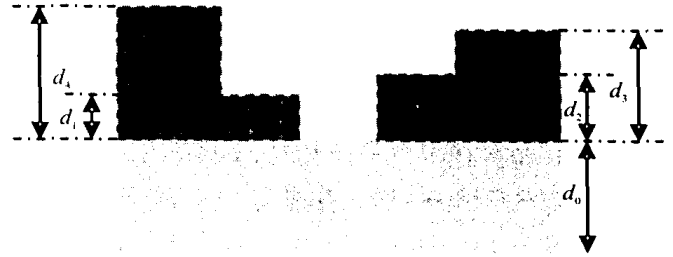
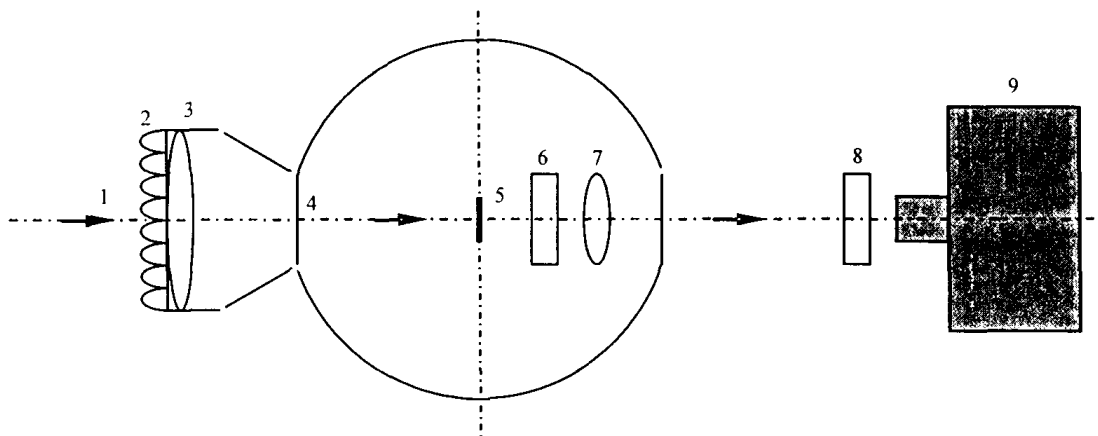


Fig. 4 Schematic configuration of multi-step target

图 4 多台阶靶结构示意图



1. driving laser; 2. lens array; 3. aspherical major lens; 4. window of the target chamber; 5. target; 6. shielding glass for imaging lens; 7. combined magnifying lens; 8. filter plate; 9. streak camera

Fig. 5 Schematic diagram of the experiment set-up

图 5 实验排布示意图

图 6(a)是铝四台阶靶实验记录图像,图像清晰,信噪比很高,而且冲击波平面性很好,平面范围也很宽。采用条纹相机的数据采集软件可以得到各发光区信号强度半高值对应的平均时刻,各台阶厚度实验前已测定。我们分别取铝基底后表面为时间和空间坐标零点,经过数据处理,得到图 6(b)所示的处理结果,冲击波速度平均值为  $20.950 \text{ km/s}$ , 相对不确定度小于  $0.5\%$ , 线性相关系数  $R$  为  $0.999\ 96$ 。结果表明,冲击波在铝材料中传播  $45 \mu\text{m}$  后,仍然是非常稳定的。受靶研制能力和相机扫程限制,冲击波在铝材料  $45 \mu\text{m}$  以后的传播情况未进行实验测量。金四台阶靶实验记录图像类似(如图 7 所示),结果表明,在铝基底厚度约  $30 \mu\text{m}$  情况下,冲击波在金台阶中传播约  $10.5 \mu\text{m}$  时,仍是比较稳定的,而当传播约  $14.5 \mu\text{m}$  时,冲击波已经衰减,因此冲击波在金材料中稳定传播的最大距离小于  $14.5 \mu\text{m}$ 。这一结果与数值模拟结果( $16.3 \mu\text{m}$ )虽然有偏差,但考虑到数值模拟的激光条件与实验实际情况不尽相同,因而两种结果还是基本吻合的。

上述数值模拟与实验结果表明,激光驱动冲击波在铝-金阻抗匹配靶中传播时,高阻抗待测材料金中的冲击波稳定传播最大距离急剧减小,相对低阻抗标准材料铝中的冲击波稳定传播最大距离会成倍下降。因此,当进行高阻抗待测材料的状态方程参数测量实验时,特别对于阻抗差别较大的铝-金阻抗匹配这样类型的实验,靶物理参数的设计应该以高阻抗材料的冲击波传播稳定性作为选择台阶厚度参数的基准。当高阻抗材料台阶

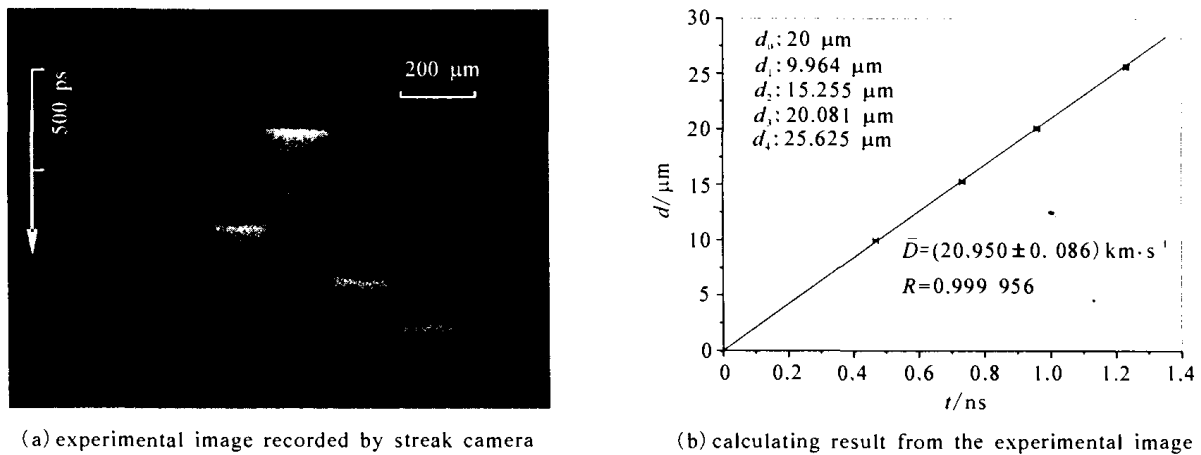


Fig. 6 Experimental results of four-step aluminum target

图 6 铝四台阶靶实验结果

厚度满足冲击波传播稳定性时,然后按照阻抗匹配靶中两种材料的冲击波速度比来确定低阻抗标准材料的台阶厚度。因此,针对神光Ⅱ第九路目前的激光条件,根据数值模拟和多台阶靶实验结果,在进行铝-金阻抗匹配靶参数设计时,选择铝基底厚度约  $30 \mu\text{m}$  较好,而两台阶厚度首先应该由金台阶厚度优化尺寸决定,应选择金台阶厚度小于  $10 \mu\text{m}$  比较稳妥,然后根据铝、金冲击波速度比(约 1.7),选择铝台阶厚度小于  $17 \mu\text{m}$  为宜。

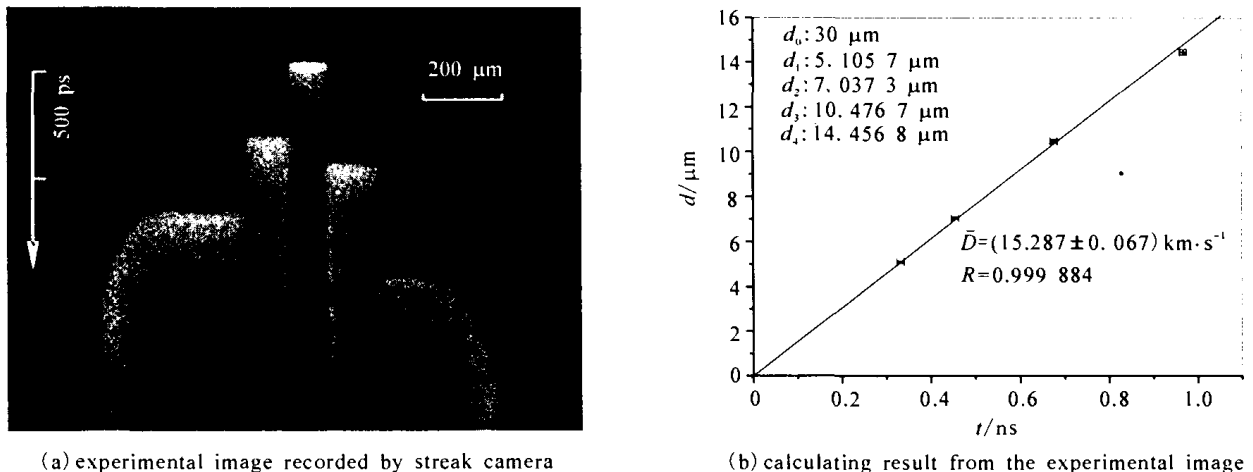


Fig. 7 Experimental results of four-step gold target

图 7 金四台阶靶实验结果

### 3 结论

针对神光Ⅱ第九路激光条件,对激光驱动冲击波在铝及铝-金阻抗匹配靶中的传播特性进行了数值模拟和实验研究,两种研究结果基本一致。结果表明,激光驱动冲击波在铝-金阻抗匹配靶中传播时,高阻抗待测材料金中的冲击波稳定传播最大距离急剧减小,相对低阻抗标准材料铝中的冲击波稳定传播最大距离会成倍下降。在进行铝-金阻抗匹配靶物理参数设计时,应保证高阻抗材料金台阶厚度满足冲击波传播稳定性,然后再按照阻抗匹配靶中两种材料的冲击波速度比来确定低阻抗标准材料铝的台阶厚度。这一靶参数设计原则同样适用于其它一些标准材料和待测材料阻抗差别较大的阻抗匹配靶。

### 参考文献:

- [1] 顾援,王永刚,傅思祖,等. 实验测定铜在  $0.4 \sim 0.8 \text{ TPa}$  压力范围内的冲击绝热线[J]. 强激光与粒子束, 1991, 3(1): 1-11. (Gu Y, Wang Y G, Fu S Z, et al. Shock adiabat measurements on copper in the pressure range from  $0.4 \text{ TPa}$  to  $0.8 \text{ TPa}$ . *High Power Laser and Particle Beams*, 1991, 3(1): 1-11)
- [2] Cattel F, Hallouin M, Romain J P, et al. Enhancement of a laser-driven shock wave up to  $10 \text{ TPa}$  by the impedance-match technique[J]. *Appl Phys Lett*, 1985, 47(7): 678-680.
- [3] Fu S Z, Gu Y, Wu J, et al. Laser-driven shock stability in Al and shock compressibilities of Fe up to  $0.8 \text{ TPa}$  and  $\text{SiO}_2$  up to  $0.4 \text{ TPa}$  [J]. *Phys Plasmas*, 1995, 2(9): 3461-3465.
- [4] Rothman S D, Evans A M, Horsfield C J, et al. Impedance match equation of state experiments using indirectly laser-driven multimegabar

- shocks [J]. *Phys Plasmas*, 2002, **9**(5): 1721-1733.
- [5] Zeldovich Ya B, Raizer Yu P. Physics of shock waves and high temperature hydrodynamic phenomena[M]. New York: Academic Press, 1967.
- [6] 张永慧,樊福如,罗平庆,等. 包含超热电子运输的激光聚变总体方程组计算方法的研究及其应用[R]. 中国核科技报告, 1987:724-733. (Zhang Y H, Fan F R, Luo P Q, et al. Study of computational method about equations for laser fusion with superthermal electron transport and its applications. *China Nuclear Science and Technology Report*, 1987:724-733)
- [7] Trainor R J, Lee Y T. Analytic models for design of laser-generated shock-wave experiments[J]. *Phys Fluids*, 1982, **25**(10): 1898-1907.
- [8] 许发明,陈绍和,陈兰荣,等. 复杂激光脉冲波形的整形[J]. 光学学报, 1996, **16**(7): 943-947. (Xu F M, Chen S H, Chen L R, et al. Shaping of laser complex shape pulse. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(7): 943-947)
- [9] Skeldon M D, Okishev A, Keck R L, et al. Optical pulse shaping system based on aperture-coupled striplines for OMEGA pulse shaping applications[C]//Proc of SPIE. 1999, **3492**: 131-135.

## Shockwave propagation stability in Al-Au impedance-matching target irradiated by high power laser

HUANG Xiu-guang<sup>1</sup>, LUO Ping-qing<sup>2</sup>, FU Si-zu<sup>1</sup>, SHU Hua<sup>1</sup>, LONG Tao<sup>2</sup>,

WU Jiang<sup>1</sup>, YE Jun-jian<sup>1</sup>, HE Ju-hua<sup>1</sup>, MA Min-xun<sup>1</sup>, GU Yuan<sup>1</sup>

(1. Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China;

2. Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing 100088, China)

**Abstract:** According to the laser conditions of the ninth beam of Shenguang-II facility, the characteristics of the laser-driving shockwave propagation in Al-Au impedance-matching target were studied by JB code and multi-step technique, respectively. The experimental results were consistent with the numerical simulation results. The results show that the shockwave's maximum stable propagation distance in gold decreases rapidly when shock front propagates from aluminum to gold. Therefore, when people design the Al-Au impedance-matching target, they should first select the Au step thickness, in which the shockwave should propagate steadily. The Al step thickness will be selected according to the calculated shockwave velocity ratio of the two materials in impedance-matching target. For the ninth beam of Shenguang-II facility, the suitable Al substrate thickness is about 30  $\mu\text{m}$ , the Au step thickness and the Al step thickness should be selected as less than 10  $\mu\text{m}$  and 17  $\mu\text{m}$ , respectively.

**Key words:** Impedance-matching; Shockwave; Stability; Numerical simulation