

文章编号: 1001-4322(2007)02-0253-04

# 激光驱动冲击波传播稳定性的计算分析\*

舒 桦<sup>1</sup>, 傅思祖<sup>1</sup>, 马民勋<sup>1</sup>, 黄秀光<sup>1</sup>, 顾 援<sup>1</sup>, 罗平庆<sup>2</sup>, 龙 滔<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘 要:** 采用简化材料状态方程, 用 1 维特征线方法计算了激光驱动冲击波在多层材料中稳定传播的距离。计算结果与用 1 维三温激光-靶耦合 JB 程序的数值模拟结果进行了比较, 二者符合得比较好。通过计算发现: 冲击波在 Au 中的稳定传播距离受基底厚度的影响很大, 稳定传播距离随基底厚度的增加先增大后减小。

**关键词:** 冲击波; 状态方程; 特征线; 阻抗匹配; JB 程序

**中图分类号:** O347.5 **文献标识码:** A

利用冲击波进行阻抗匹配实验可以获得物质状态方程(EOS)参数<sup>[1-4]</sup>。冲击波稳定传播<sup>[5-6]</sup>是保证 EOS 数据精度的基本要求之一。激光驱动冲击波传播稳定性可以利用数值模拟进行研究, 也可以通过实验进行研究。本文提出了一种简单的方法对阻抗匹配实验中的冲击波稳定性进行了估算, 估算结果和 JB 程序的计算结果符合较好。

## 1 冲击波稳定性计算方法概述

首先, 假设驱动激光的时间波形为梯形脉冲, 脉宽(FWHM)为 2 ns, 脉冲的上升沿和下降沿都是 300 ps。对于单层材料靶, 激光辐照靶表面产生冲击波, 冲击波先经历一个加速过程, 然后经历一个匀速过程, 最后被由激光强度减弱而产生的稀疏波赶上, 逐渐开始衰减。对于阻抗匹配靶(以 Al-Au 阻抗靶为例), 其结构比较复杂。阻抗匹配靶内冲击波传播过程中的波系相互作用如图 1 所示。当激光辐照靶前表面时, 所形成的冲击波  $S_1$  向靶内传播时在 Al-Au 界面上反射一个冲击波  $S_2$ , 透射一个冲击波  $S'_1$ , 当  $S_2$  在传播过程中和烧蚀面或来自烧蚀面的稀疏波相碰时, 反射一个稀疏波  $R_1$ 。当  $R_1$  传播到 Al-Au 界面时透射的仍然是稀疏波  $R'_1$ 。稀疏波以当地声速传播, 而冲击波对波后介质是亚声速传播的, 这样  $R'_1$  必然赶上  $S'_1$ , 从而使  $S'_1$  衰减。因此在激光驱动的状态方程实验时, 应考虑将样品的尺寸设计在冲击波稳定传播<sup>[7]</sup>的范围内, 以避免冲击波不稳定性带来的不良后果。

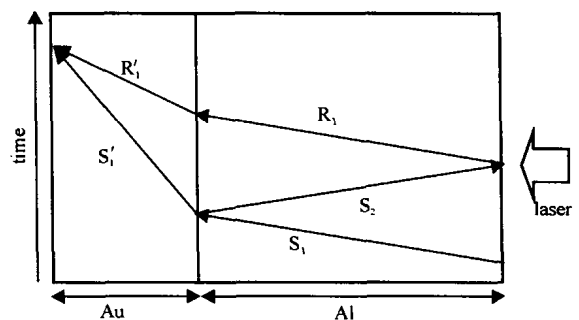


Fig. 1 Dynamics of shock and rarefaction waves in a two-layer target

图 1 冲击波传播过程中的波系相互作用示意图

对于大多数材料来说, 冲击波速度  $D$  与波后粒子速度  $u$  有比较好的线性关系, 即  $D = c_0 + \lambda u$ , 其中  $c_0, \lambda$  为常数, 称为材料的 Hugoniot 参数。设有一冲击波(速度为  $D_{Al}$ )由基底传入样品, 由冲击波速度与波后粒子速度的线性关系可以解得粒子速度

$$(u_{Al})_1 = (D_{Al} - c_0) / \lambda \tag{1}$$

从而得到压强为

$$p_{Al} = (\rho_{Al})_0 D_{Al} (u_{Al})_1 \tag{2}$$

此时一次冲击材料(Al)的密度为

$$(\rho_{Al})_1 = (\rho_{Al})_0 \frac{D_{Al}}{D_{Al} - (u_{Al})_1} \tag{3}$$

\* 收稿日期: 2006-08-07; 修订日期: 2006-12-05

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 舒桦(1979—), 男, 硕士, 从事激光高压状态方程的实验研究; shuhua\_79@hotmail.com.

在冲击波传播到 Al-Au 交界面上时,根据阻抗匹配原理及压强和粒子速度连续性条件,可求出透射冲击波速度  $D_{Au}$  和  $u_{Au} = (u_{Al})_2$ ,进而求得  $(p_{Al})_2 = p_{Au} = (\rho_{Au})_0 D_{Au} u_{Au}$ 。其中下标 Al 表示基底材料中的参数,Au 表示样品材料中的参数。下标“0,1,2”分别表示材料的初始状态、一次压缩状态和二次压缩状态。

### 2 冲击波稳定性具体估算

如图 1 所示,当  $R'_1$  赶上  $S'_1$  时,冲击波的稳定性会受到严重的影响。对于梯形脉冲(上升沿和下降沿均为 0.3 ns,半高宽为 2 ns)的驱动激光,可用 1 维特征线表示,如图 2 所示。图 2 中,  $x=0$  处为烧蚀层的前界面,即激光辐照的表面;

①为冲击波的运动轨迹,它包括一个加速过程( $t < 0.3$  ns)和一个稳定传播过程;②为烧蚀面的运动轨迹,由一个加速过程和一个稳定传播过程组成;③为透射冲击波的运动轨迹,其特征线方程为  $dx/dt = D_{Au}$ ;④为稀疏波的运动轨迹,其特征线方程为  $dx/dt = (c_{Al})_1 + (u_{Al})_1$ ,其中  $(c_{Al})_1$  为基底材料(Al)一次冲击压缩状态中的当地声速;⑤为反射冲击波运动轨迹,  $dx/dt = D_r$  ( $D_r$  为反射冲击波的速度);⑥为 Al-Au 界面的运动轨迹,其特征线方程为  $dx/dt = (u_{Al})_2 = u_{Au}$ ;⑦为反射稀疏波的传播轨迹,其特征线方程为  $dx/dt = (c_{Al})_2 + (u_{Al})_2$ ,其中  $(c_{Al})_2$  为二次冲击后的当地声速;⑧为透射稀疏波的传播轨迹,其特征线方程为  $dx/dt = (c_{Au})_1 + (u_{Au})_1$ ,其中  $(c_{Au})_1$  为当地声速。透射冲击波在 Au 材料中稳定传播的距离为  $x_7 - x_3$ 。下面我们来计算  $x_7 - x_3$  的大小。

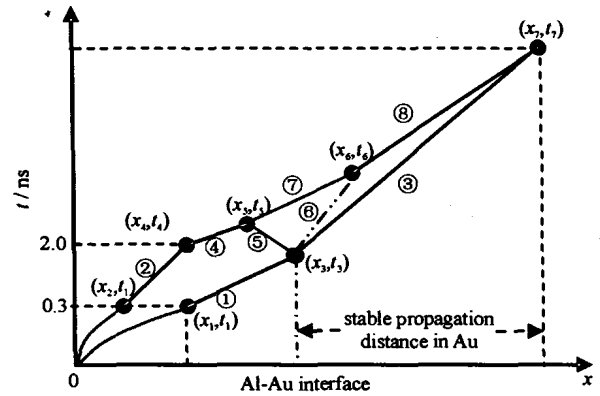


Fig. 2 One dimension characteristic line of shock wave propagation in Al-Au impedance matching target

图 2 Al-Au 阻抗靶中冲击波传播过程中的 1 维特征线

冲击波在 Al 中的传播轨迹①可分成两段(加速阶段和稳定传播阶段)。假设在激光强度上升阶段冲击波是匀加速的。激光峰值时冲击波的稳定传播速度是  $D_{max}$ ,则在  $t < t^* = 0.3$  ns 时冲击波速度可以表示为

$$D = \frac{t}{t^*} D_{max} \tag{4}$$

其加速度表示为

$$a_s = \frac{dD}{dt} = \frac{D_{max}}{t^*} \tag{5}$$

$$x_1 = \frac{1}{2} a_s t^{*2} = \frac{1}{2} D_{max} t^* \tag{6}$$

Al 中冲击波稳定传播阶段的传播轨迹可以表示为

$$x - x_1 = D_{max} (t - 0.3) \tag{7}$$

烧蚀面的运动轨迹②也分为加速阶段和稳定传播阶段,  $t < t^* = 0.3$  ns 时,由冲击波速度和粒子速度的线性关系式(1)可以得到粒子速度的加速度为

$$a_u = D_{max} / \lambda t^* \tag{8}$$

$$x_2 = \frac{1}{2} a_u t^{*2} = \frac{1}{2} \frac{D_{max} t^*}{\lambda} \tag{9}$$

烧蚀面稳定传播阶段的传播轨迹可以表示为

$$x - x_2 = (u_{Al})_1 (t - 0.3) \tag{10}$$

轨迹③的方程可以表示为

$$x - x_3 = D_{Au} (t - t_3) \tag{11}$$

轨迹④的方程可以表示为

$$x - x_4 = [(u_{Al})_1 + (c_{Al})_1] (t - t_4) \tag{12}$$

点  $(x_5, t_5)$  是轨迹④与轨迹⑤的交点,即

$$\begin{cases} x - x_4 = [(u_{Al})_1 + (c_{Al})_1] (t - t_4) \\ x - x_3 = D_r (t - t_3) \end{cases} \tag{13}$$

至于反射冲击波速度  $D_r$ ，由冲击波关系式

$$(p_{Al})_2 - (p_{Al})_1 = (\rho_{Al})_1 [D_r - (u_{Al})_1] [(u_{Al})_2 - (u_{Al})_1] \quad (14)$$

可以求得反射波冲击速度  $D_r$ 。当地声速  $(c_{Al})_1$  可用(17)求得

对于凝聚介质可采用实用状态方程<sup>[8]</sup>

$$p = c_0^2(\rho - \rho_0) + (\gamma - 1)\rho e \quad (15)$$

式中： $c_0$  正常态时的声速； $e$  是比内能；系数  $\gamma$  可以表示为

$$\gamma = 2\lambda - 1 + \sqrt{(2\lambda - 1)^2 - 1} \quad (16)$$

利用冲击波速度和波后粒子速度的线性关系式(1)，就可以确定系数  $\gamma$ 。声速  $(C_{Al})_1, (C_{Al})_2$  分别表示一次冲击和二次冲击的当地声速。它们都可由(17)式求出。

与(15)式对应的声速表达式为

$$c^2 = \frac{\gamma p}{\rho} + \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho} \quad (17)$$

轨迹⑥的方程可以表示为

$$x - x_3 = (u_{Au})_1(t - t_3) \quad (18)$$

轨迹⑦的方程可以表示为

$$x - x_5 = \{(u_{Al})_2 + (c_{Al})_2\}(t - t_5) \quad (19)$$

式(19)中  $(c_{Al})_2$  为二次冲击后 Al 中的当地声速， $(c_{Al})_2$  当地声速，可以由(17)式计算。

$(x_6, t_6)$  是轨迹⑥和轨迹⑦的交点。联立方程(15)，(16)即可求得。

轨迹⑧的方程可以表示为

$$x - x_6 = [(u_{Au})_1 + (c_{Au})_1](t - t_6) \quad (20)$$

$(x_7, t_7)$  是轨迹③和轨迹⑧的交点。由方程(11)，(20)即可求得。

这样，冲击波在 Au 材料在中的稳定传播距离  $x_7 - x_3$  可以求出。

### 3 Al-Au 阻抗靶冲击波稳定性计算

现以 Al 中冲击波速度  $D_{max} = 25 \text{ km/s}$  为例进行计算，Al 的参数为： $c_{Al} = 5.826 \text{ km/s}$ ， $\lambda_{Al} = 1.208$ ， $(\rho_{Al})_0 = 2.71 \text{ g/cm}^3$ ， $\gamma_{Al} = 2.41$ 。Au 的参数为： $c_{Au} = 3.68 \text{ km/s}$ ， $\lambda_{Au} = 1.32$ ， $(\rho_{Au})_0 = 19.3 \text{ g/cm}^3$ ， $\gamma_{Au} = 2.94$ 。因此，按上述方法可以求得反射波冲击速度  $D_r = 10.2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ，Al 中一次压缩、二次压缩和 Au 中一次压缩的状态的计算结果如表 1 所示。

表 1 按照阻抗匹配法计算的状态点

Table 1 Hugoniot states calculated by impedance matching method

$(p_{Al})_1$	$(u_{Al})_1$	$(c_{Al})_1$	$(\rho_{Al})_1$	$(p_{Al})_2$	$(u_{Al})_2$	$(c_{Al})_2$	$(\rho_{Al})_2$	$(p_{Au})_1$	$(u_{Au})_1$	$(c_{Au})_1$	$(\rho_{Au})_1$
/GPa	/(km/s)	/(km/s)	/(g/cm <sup>3</sup> )	/GPa	/(km/s)	/(km/s)	/(g/cm <sup>3</sup> )	/GPa	/(km/s)	/(km/s)	/(g/cm <sup>3</sup> )
1.075	15.873	18.686	7.42	2.484	8.58	24.108	10.3	2.484	8.58	12.697	45.1

用上述方法计算了  $(x_3, t_3), (x_5, t_5), (x_6, t_6), (x_7, t_7)$  4 组时空节点(分别对应冲击波到达 Al-Au 界面时刻，反射冲击波和稀疏波相遇时刻，稀疏波追上 Al-Au 界面时刻，稀疏波追上 Al 中冲击波时刻)的值，结果如表 2 所示。从表 2 中的计算结果可以看出冲击波在 Au 中的稳定传播距离随着基底厚度的增加先增大后减小。冲击波在 Au 材料中的稳定传播距离和基底厚度的选择关系密切。其中 JB results 表示用 1 维三温激光靶耦合 JB 程序计算结果，可以看出简化的模型计算结果和理论计算结果大致符合。因此，可以用 1 维特征线方法对阻抗匹配靶中高阻抗材料的稳定性进行估算，为靶参数设计提供参考。

表 2 用 1 维特征线方法计算的金中冲击波稳定传播跨度

Table 2 Calculated shock wave stable propagation distances in Au medium by 1D characteristic line method

$x_3/\mu\text{m}$	$t_3/\text{ns}$	$t_5/\text{ns}$	$t_6/\text{ns}$	$t_7/\text{ns}$	$(x_7 - x_3)/\mu\text{m}$	JB results $(x_7 - x_3)/\mu\text{m}$
20	0.95	1.202	1.398	1.856	13.590	11.0
25	1.15	1.472	1.723	2.309	17.386	13.7
40	1.75	2.165	2.488	3.243	22.395	23.0
50	2.15	2.479	2.735	3.333	17.751	19.1

## 4 结 论

用 1 维特征线方法计算结果和 1 维三温激光-靶耦合 JB 程序的计算结果是大致相符的。从计算结果我们可以得出当进行高阻抗待测材料的 EOS 参数测量实验时,高阻抗待测材料测试区冲击波稳定传播最大距离急剧减小,相对低阻抗标准材料测试区冲击波稳定传播距离会成倍下降。因此,对于阻抗差别较大的 Al-Au 阻抗匹配类型的实验,应该以高阻抗材料的冲击波传播稳定性为选择测试区宽度的基准。当高阻抗材料测试区满足冲击波传播稳定性时,然后按照阻抗匹配模拟给出的冲击波速度比确定标准材料测试区的相应宽度。如果要进行冲击波传播稳定性验证实验,也应该优先进行由标准材料基底和待测材料楔形部件构成的楔形靶实验。而当标准材料和待测材料阻抗相近时,才可以参考低阻抗标准材料稳定性验证数据确定高阻抗材料测试区宽度。已有文献报道的冲击波传播稳定性实验,都是以低阻抗标准材料楔形靶实验为基准的,其应用范围比较有限。

### 参 考 文 献:

- [1] Van Kessel C G M, Sigel R. Observation of laser-driven shock waves in solid hydrogen[J]. *Phys Rev Lett*, 1974, **33**:1020-1023.
- [2] Cottel F, Hallouin M, Romain J P, et al. Enhancement of a laser-driven shock wave up to 10 TPa by the impedance-match technique[J]. *Appl Phys Lett*, 1985, **47**:678-680.
- [3] Ng A, Parfeniuk D, DaSilva L B. Hugoniot measurements for laser-generated shock waves in aluminum[J]. *Phys Rev Lett*, 1985, **54**:2604-2607.
- [4] 经福谦. 实验物态方程导引[M]. 北京: 科学出版社, 1988. (Jing F Q. Guide of experimental equation of state. Beijing: Science Press, 1988)
- [5] Rothman S D, Evans K 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.
- [6] Ozaki N A, Tanaka K A, Ono T, et al. GEKKO/HIPER-driven shock waves and equation-of-state measurements at ultrahigh pressures[J]. *Phys Plasmas*, 2004, **11**(4): 1600-1608.
- [7] Batani D, Balducci A, Nazarov W, et al. Use of low-density foams as pressure amplifier in equation-of-state experiments with laser-driven shock waves[J]. *Phys Rev E*, 2001, **63**: 046401.
- [8] 李维新. 一维不定常流与冲击波[M]. 北京: 国防工业出版社. 2003. (Li W X. One-dimensional nonsteady flow and shock waves. Beijing: National Defence Industry Press, 2003)

## Calculation on laser driven shock wave stability of propagation

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

(1. *National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Laser Plasma, CAEP, P. O. Box 800-229, Shanghai 201800, China;*

2. *Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China*)

**Abstract:** Laser driven shock wave stability of propagation in impedance match target was studied using one dimension characteristic line method. In addition, one dimension three temperature laser-target coupling JB program was used to simulate it. It was compared with simplified equation of state. The results of the two methods agree well. The calculation results show that shock wave stability of propagation in Au depends closely on the thickness of the Al base.

**Key words:** Shock wave; Equation of state; Characteristic line; Impedance match; JB program