

一种激光驱动高压状态方程绝对 测量方法的探索*

黄秀光¹⁾ 罗平庆²⁾ 傅思祖¹⁾ 顾 援¹⁾ 马民勋³⁾ 吴 江¹⁾ 何钜华¹⁾

¹⁾ (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)

³⁾ (上海电力学院基础部, 上海 200090)

(2001 年 4 月 19 日收到, 2001 年 8 月 13 日收到修改稿)

数值模拟了激光直接驱动铝飞片空腔靶的物理过程. 模拟结果表明, 如果靶结构参数与激光条件匹配, 飞片与靶可以近似实现对称碰撞, 而且冲击波在靶中存在稳定传播区. 采用结构参数合理的飞片双面台阶靶, 可能实现状态方程的绝对测量. 同时进行了实验探索, 实验结果与数值模拟结果基本吻合.

关键词: 绝对测量, 飞片双面台阶靶, 数值模拟, 状态方程

PACC: 6490, 0290, 5250J, 5235T

1 引 言

材料的高压状态方程是武器设计的重要参数; 也是惯性约束聚变领域中重要的研究内容. 同时, 它在天体物理、星际物理、地球物理、高密度等离子体及材料研究等许多学科领域中都具有重要的科学运用价值.

20 多年来, 随着高功率激光器的陆续建立和不断完善, 逐步打开了一条在实验室利用高功率激光驱动(直接或间接驱动)产生的强冲击波进行材料高压状态方程研究的技术途径. 激光驱动产生的冲击波压强已从刚开始的 0.2TPa ^[1] 发展到近几年的几 TPa ^[2,3], 甚至 75TPa ^[4], 获得了一些材料在太帕范围的雨贡纽数据^[5-7]. 但是这些实验数据大多数是用阻抗匹配法得到的, 它们的可靠性极大地依赖于标准材料的雨贡纽数据, 而往往在所测的太帕压强范围内, 并没有相应的标准材料的雨贡纽实测数据. 因此, 近年在太帕压强范围内进行状态方程参数的绝对测量一直是世界各国相关科技工作者努力试图解决的问题.

对于低 Z 材料, 如 D_2 , T_2 , Be 等, 采用 X 射线侧向照相术成功地对它们实现了状态方程的绝对测

量, 并取得了很好的实验结果^[8-10]. 但这种方法目前仅适用于对低 Z 材料的测量, 对中、高 Z 材料目前还无法采用此种方法进行测量. Cauble 等人提出了用飞片三台阶靶技术来进行中、高 Z 材料激光驱动状态方程绝对测量的设想^[4]. 我们提出了类似的方法, 即飞片双面台阶靶技术^[11].

首先对激光直接驱动铝飞片碰撞铝靶的物理过程进行了数值模拟, 根据模拟结果确定了靶结构参数, 最后进行了实验探索.

2 数值模拟结果与分析

2.1 模拟方案简介

JB 程序^[12,13]是在一维三温流体力学基础上耦合了超热电子多群限流和自洽电场的计算程序. 我们用它来数值模拟激光直接驱动铝飞片碰撞铝靶物理过程. 首先模拟激光驱动飞片的运动, 当飞片碰到静止的靶之后, 则将飞片和靶合成一个整体进行模拟. 如图 1 所示, 一束脉冲宽度(FWHM)为 1ns 、波长为 $1.053\mu\text{m}$ 的高斯型激光脉冲驱动铝飞片(其自由面的初始位置为 $1000\mu\text{m}$)与相距 $100\text{—}150\mu\text{m}$ 的铝靶(其前端面的初始位置为 $900\text{—}850\mu\text{m}$)相碰, 激光

* 国家高技术惯性约束聚变基金(批准号: 863-416-3-5.1)资助的课题.

焦斑直径 $\Phi = 600\mu\text{m}$. 取 R 轴正向为速度正向. 铝的初始密度 $\rho_0 = 2.71\text{g}/\text{cm}^{-3}$; 冲击波线性关系式 $D = C_0 + \lambda U_p$ 中 $C_0 = 5.52\text{km}/\text{s}$, $\lambda = 1.206$.

峰值密度接近其初始密度, 使得飞片与靶可以实现对称碰撞或近似对称碰撞.

表 1 两种模型在不同碰靶距离时的峰值密度宽度 L 和平均峰值密度 $\bar{\rho}$

模型号	参数	碰靶距离/ μm				
		100	110	130	140	150
TP05	$L/\mu\text{m}$	3.54	3.34	3.42	3.29	3.24
	$\bar{\rho}/(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.96	2.94	2.87	2.84	2.84
FTP1C	$L/\mu\text{m}$	3.84	3.66	3.37	3.32	2.86
	$\bar{\rho}/(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.99	2.95	2.89	2.85	2.84

注: TP05 对应激光功率密度 $0.5 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$, 飞片厚度 $10\mu\text{m}$; FTP1C 对应激光功率密度 $1 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$, 飞片厚度 $13\mu\text{m}$.

2.3 靶中冲击波阵面压强的传播特征

模拟结果表明, 靶中冲击波阵面压强依次经历了冲击波形成及快速增长区、冲击波阵面峰值压强区和冲击波阵面压强缓慢衰减区. 我们研究了激光功率密度、飞片厚度、碰靶距离、脉宽等参数对靶中冲击波特性的影响.

随激光功率密度的增大, 靶中冲击波形成及快速增长区宽度 (L_r) 变窄, 靶中冲击波阵面峰值压强相对稳定区宽度 (L_m) 也变窄, 但靶中冲击波阵面峰值压强 (P_m) 却随激光功率的增大而增加, 见图 3 所示. 这是因为对应相同的飞片厚度和空腔长度, 驱动激光功率密度的增加, 肯定导致飞片飞行速度的增加, 从而使 P_m 增加; 尽管由于飞片自由面解压厉害, 使得飞片前沿低密度区加宽, 但其密度非常低, 反而使 L_r 减小; 同时峰值密度区变窄, 从而使 L_m 也减小.

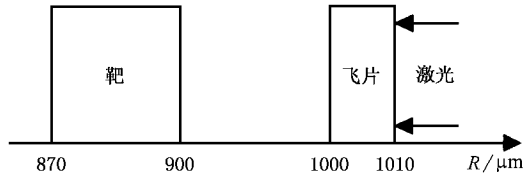


图 1 激光直接驱动飞片空腔靶结构示意图

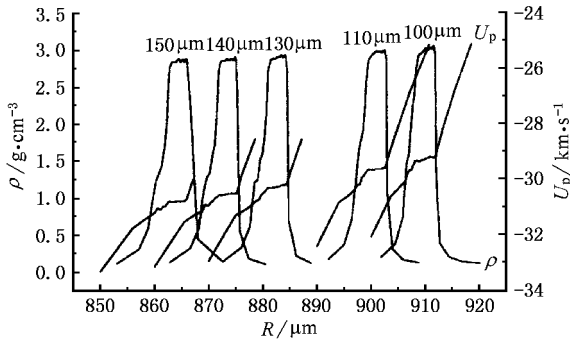


图 2 激光功率密度 $0.5 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$, 飞片厚度 $10\mu\text{m}$, 五种碰靶距离 (100, 110, 130, 140, 150 μm) 碰靶时的飞片密度和速度的空间分布

2.2 飞片的飞行状态

图 2 给出了一种模型的飞片在五种碰靶距离碰靶时的密度和速度的空间分布特征, 主要描述向着靶方向飞行的流体密度和速度. 如图所示, 飞片飞行一定的距离后, 飞片飞行前沿的密度较低, 但有最大的流体速度, 往后密度增大, 相应区域的流体速度有所下降, 在密度峰值两侧基本维持较高速度, 再往后是密度快速下降区, 相应的流体速度也迅速减小. 对于厚度一定的飞片, 当激光功率较小时, 飞片中冲击波强度较小, 冲击波从飞片卸载后, 飞片自由面膨胀不太剧烈, 飞片飞行一段距离后, 最大密度下降较缓慢, 趋于初始密度, 且峰值密度区较宽. 而当激光功率密度较大时, 飞片中冲击波强度也较大, 飞片冲击波卸载后, 飞片自由面汽化和膨胀较剧烈, 甚至完全汽化, 成为等离子体簇团, 峰值密度下降很快, 且峰值密度很小. 模拟结果表明, 如果飞片厚度与激光功率密度匹配, 则自由面飞行几十微米以后, 飞片峰值密度下降变得缓慢, 趋于初始密度, 且峰值密度区较宽, 见表 1 所示. 这样, 就有可能很好地控制飞片的

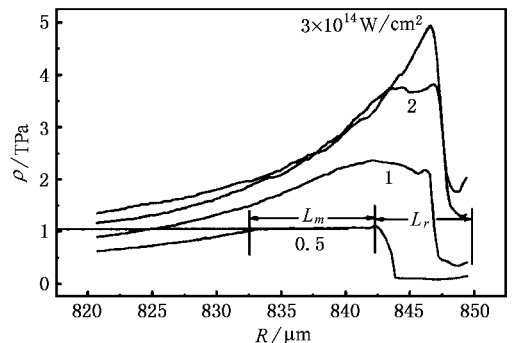


图 3 飞片厚度为 $10\mu\text{m}$, 空腔长度为 $150\mu\text{m}$, 激光功率密度分别为 $0.5, 1, 3 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 时, 靶中冲击波阵面压强随传播距离的变化 (L_r, L_m, P_m 的物理意义标于曲线 0.5)

随碰靶距离的增大(100—150 μm), L_r 略有增加, L_m 略有减小, P_m 略有增加,总体变化不大.这是因为,对于激光功率密度不是非常大的情况,随碰靶距离的加大,飞片速度有所增加,而峰值密度的变化较小,飞片-靶界面做功略有增强,引起 P_m 略有升高;飞片前沿低密度区长度略有加大,使 L_r 略有增加,但飞片的峰值密度区有所变窄,导致 L_m 有所减小.

随着飞片厚度的增加, L_r 增大, L_m 也增加, P_m 下降.这是因为随着飞片厚度的增加,飞片的飞行速度降低,引起靶中冲击波阵面压强减小;飞片加厚,飞片前沿低密度区宽度增加,相应的峰值密度区宽度也增加,导致 L_r 和 L_m 都相应增加.

在激光功率密度不变的情况下,增加激光脉宽,自然增加了激光能量,相应激光的吸收能量也成倍增长,使飞片储能得到较大增长,飞片向前飞行部分的质量及接近飞片前沿运动速度的区域的质量都明显增加.如果飞片厚度选择较为合适,则 L_m 会有所增加, P_m 也有所增加,如果飞片厚度选择不恰当,则 L_m 增加不多,甚至更窄,不利于实验测量.

综上所述,激光功率密度、飞片厚度、腔长等对飞片状态和靶中冲击波特性有明显的影响,一般而言,激光功率密度和飞片厚度对飞片状态和靶中冲击波特性的影响较大,而空腔长度超过一定距离后,对飞片状态和靶中冲击波特性影响不明显.如果靶结构参数与激光条件优化匹配,则飞片和靶能近似实现对称碰撞,同时可在靶中获得具有良好稳定区和一定增压效果的冲击波.采用结构参数合理的飞片双面台阶靶,可能近似实现状态方程的绝对测量.

3 飞片双面台阶靶绝对测量原理及靶结构设计原则

飞片空腔双面台阶靶的靶型采用图4所示结构.如果在第三台阶 h_3 中冲击波传播是稳定的,则由第二和第三台阶背面的冲击波卸载发光信号的时间差($t_C - t_B$),可以得到靶中冲击波速度 D ,

$$D = \frac{h_3}{(t_C - t_B)}. \quad (1)$$

如果飞片匀速飞过第一台阶 h_1 ,则由靶背面的三个发光信号时间,可以得到飞片碰靶速度 W_f ,

$$W_f = \frac{h_1}{(t_B - t_A) + \frac{h_1}{h_3}(t_C - t_B)}. \quad (2)$$

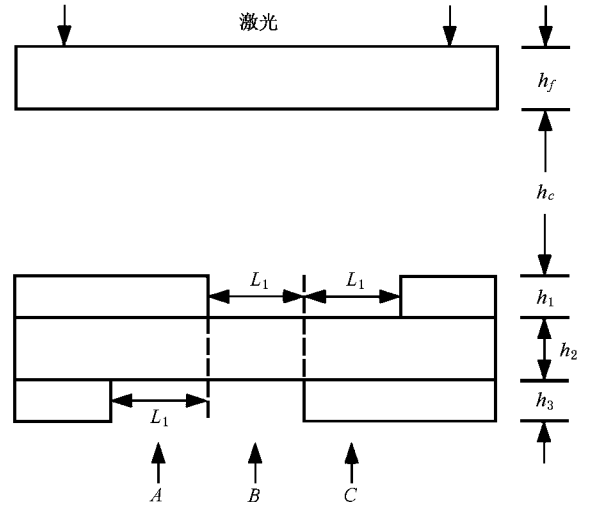


图4 激光直接驱动飞片双面台阶靶实验示意图(h_f 为飞片厚度, h_1, h_2, h_3 靶对应的三个台阶高度, h_c 为碰靶距离, L_1 为靶横向特征宽度($3 \times L_1 = \Phi$, Φ 为激光光斑直径), A, B, C 为靶背面冲击波三个发光信号测量区)

如果 $h_1 = h_3$,则(2)式可简化为

$$W_f = \frac{h_1}{(t_C - t_A)}. \quad (3)$$

如果飞片和靶满足对称碰撞条件,即飞片和靶为同种材料,且在碰撞前均处于室温、常压、常密度状态,则波后粒子速度 U_p 等于飞片碰靶速度 W_f 的一半,即

$$U_p = W_f/2, \quad (4)$$

这样就等效于同时测量到冲击波速度和波后粒子速度,实现状态方程的绝对测量.

在实际的飞片空腔双面台阶靶设计中,飞片厚度和空腔长度的选择,要考虑到在给定的激光辐照条件下,飞片碰靶时既能达到尽可能大的速度,又能保证飞片峰值密度接近其初始密度,且峰值密度区较宽.靶的各台阶高度的选取,要保证实验测量区落在冲击波稳定传播的范围内.考虑了这些因素后,根据数值模拟结果,给出了靶的各项设计参数,见表2.

表2 与激光功率密度相匹配的各项靶参数

功率密度 $I/(10^{14} \text{W}/\text{cm}^2)$	飞片		空腔长度		双面台阶靶				
	材料	$h_f/\mu\text{m}$	$h_c/\mu\text{m}$		材料	$h_1/\mu\text{m}$	$h_2/\mu\text{m}$	$h_3/\mu\text{m}$	$L_1/\mu\text{m}$
0.5		10							
1	Al	13	100-150		Al	5	10	5	200
2		15							

4 飞片双面台阶靶进行状态方程绝对测量的实验探索

4.1 实验条件

实验是在高功率激光物理国家实验室的“神光-II”装置上进行的,只考虑单束激光驱动情况,实验排布如图5所示.图中 O 为靶室中心,①为驱动激光,②为用于光路准直的平行光管,③为记录系统(用可见光条纹相机记录靶背冲击波发光信号), T 为靶面位置(放置各种类型的靶), M 为可见光反射镜, L_1 为针对靶背冲击波发光信号的成像放大系统.

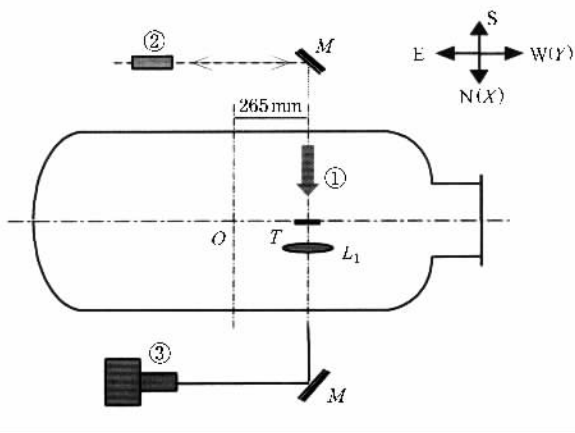


图5 状态方程实验的排布示意图

实验中,装置的单路输出激光经列阵透镜均匀化系统聚焦,在靶面形成约 $350\mu\text{m}$ 的“平顶”结构的焦斑光强分布.激光波长为 $1.053\mu\text{m}$,脉冲宽度(FWHM) $\sim 1\text{ns}$.

4.2 结果与分析

图6是扫描相机记录到的飞片双面台阶靶背面

冲击加热发光图像,图中垂直方向,从上到下是时间分辨方向,水平方向是空间分辨方向. A, B, C 箭头所指区域分别对应图4的三个发光区域.根据上节所讲的测量原理,由这三个时间信号及相应的靶台阶高度,可以计算出飞片碰靶时的飞行速度 W_f 和靶中冲击波速度 D .利用铝的冲击波关系是 $D = C_0 + \lambda U_p$,可以得到一个波后粒子速度 U_{pD} ;如果假定飞片与靶满足对称碰撞条件,则波后粒子速度等于飞片碰靶速度的一半,即 $U_{pW} = W_f/2$.通过对这两种方法得到的粒子速度的比较,我们可以看出飞片与靶是否满足对称碰撞条件,表3列出了实验结果.从实验结果看出,两种方法得到的粒子速度的差别不大,与数值模拟结果基本吻合,说明尽管飞片与靶不可能严格满足对称碰撞条件,但是可能近似满足对称碰撞条件.另外,实验测到的飞片在空腔中的飞行时间与数值模拟结果也基本吻合,说明JB程序是可靠的,有相当的可信度.如果冲击波靶背面发光信号的平面性好且范围更宽,加上更为合理的靶设计,飞片空腔双面台阶靶技术是有可能成为一种进行中、高 Z 材料激光驱动高压状态方程绝对测量的有效方法.

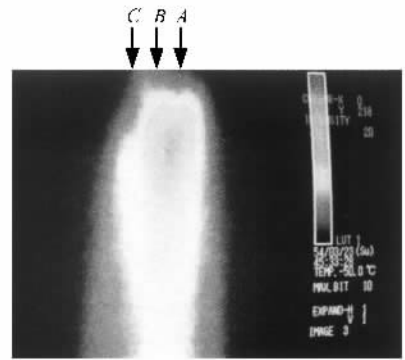


图6 飞片空腔双面台阶靶实验测量结果

表3 有关参数的测量结果与计算结果

h_1	h_3	$\Delta t_{CB} = t_C - t_B$	$\Delta t_{BA} = t_B - t_A$	D	W_f	U_{pD}	U_{pW}	$\delta_{DW} = U_{pD} - U_{pW} / U_{pD}$
$/\mu\text{m}$	$/\mu\text{m}$	$/\text{ps}$	$/\text{ps}$	(km/s)	(km/s)	(km/s)	(km/s)	$\%$
5.26	5.64	248.9	-36.4	22.66	26.88	14.21	13.44	5.42

5 结 论

数值模拟了激光直接驱动铝飞片碰撞铝靶模型.模拟结果表明,如果靶结构参数与激光条件匹

配,飞片与靶可以近似实现对称碰撞,而且冲击波在靶中传播存在较长的稳定区,采用结构参数合理的飞片双面台阶靶,可能实现状态方程的绝对测量.实验结果与数值模拟结果基本相符,说明JB程序具有相当的可信性,飞片双面台阶靶技术有望成为一种

进行中、高 Z 材料激光驱动高压状态方程绝对测量的有效方法.

- [1] Van Kessel C G M and Sigel R 1974 *Phys. Rev. Lett.* **33** 1020 1857
- [2] Cottel F , Hallouin M , Romain J P *et al* 1985 *Appl. Phys. Lett.* **47** 678 [9] DaSiva L B , Celliers P , Collins G W *et al* 1997 *Phys. Rev. Lett.* **78** 483
- [3] Ng A , Parfeniuk D and DaSilva L B 1985 *Phys. Rev. Lett.* **54** 2604 [10] Cauble R , Perry T S , Bach D R *et al* 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1248
- [4] Cauble R , Phillion D W , Hoover T J *et al* 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 2102 [11] Huang X G , Luo P Q 1999 *Acta Phys. Sin.* **48** 2314 (in Chinese) [黄秀光、罗平庆 1999 物理学报 **48** 2314]
- [5] Fu S Z , Gu Y , Wu J *et al* 1995 *Phys. Plasmas* , **2** 3461 [12] Zhang Y H *et al* 1989 *China Reports on Nuclear Science and Technology* , CNIC-00160 (in Chinese) [张永慧等 1989 中国核科技报告 CNIC-00160]
- [6] Benuzzi A , Lower T , Koenig M *et al* 1996 *Phys. Rev. E* **54** 2162 [7] Jiang S E , Zheng Z J , Li W H *et al* 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 94 (in Chinese) [江少恩、郑志坚、李文洪等 2000 物理学报 **49** 94] [13] Lai D X *et al* 1989 *China Reports on Nuclear Science and Technology* , CNIC-00448 (in Chinese) [赖东显等 1989 中国核科技报告 CNIC-00488]
- [8] Cauble R , DaSilva L B , Perry T S *et al* 1997 *Phys. Plasmas* **4**

The research of a method of absolute measurement for laser-driven high pressure equation of state*

Huang Xiu-Guang¹⁾ Luo Ping-Qing²⁾ Fu Si-Zu¹⁾ Gu Yuan¹⁾ Ma Min-Xun³⁾ Wu Jiang¹⁾ He Ju-Hua¹⁾

¹⁾ (Shanghai Institute of Laser Plasma , Shanghai 201800 , China)

²⁾ (Beijing Institute of Applied Physics & Computational Mathematics , Beijing 100088 , China)

³⁾ (Department of Basic Science , Shanghai Institute of Electric Power , Shanghai 200090 , China)

(Received 19 April 2001 ; revised manuscript received 13 August 2001)

Abstract

Numerical simulations of the whole physical process of aluminum flyer-vacuum-target directly driven by high power laser were presented. Simulation results showed that a symmetric impact will be realized between the flyer and the target and there is a wide stable area of shock wave propagation in the target if the parameters of flyer-vacuum-target and the conditions of laser match. And the absolute measurement of equation of state (EOS) may be approached if the structure parameters of flyer both-side-step-target are chosen reasonably. At the same time , the experimental researches of absolute measurement for EOS were conducted , and the experimental results are in accord with the simulation results on the whole.

Keywords : absolute measurement , flyer both-side-step - target , numerical simulation , equation of state

PACC : 6490 , 0290 , 5250J , 5235T

* Project supported by the National High Technology Inertial Confinement Fusion Foundation of China (Grant No. 863-416-3-5.1).