

激光驱动高压冲击波的实验观察

顾 援 倪元龙 王勇刚 毛楚生 吴逢春 吴 江 朱 俭 万炳根

(工程物理研究院)

1988 年 2 月 1 日收到

本文介绍能量约 500 J, 脉宽约 1.2 ns 的高功率激光脉冲聚焦辐照铝箔靶或铝台阶靶, 用可见光超快速扫描相机观察靶背面冲击加热发光的情况。实验表明, 采用特别的组合透镜聚焦, 使激光冲击波的平面性得到明显的改善。实验测得铝台阶中的冲击波速度为 $17.6 \mu\text{m}/\text{ns}$, 并推算出相应的冲击波压力达 4.4 Mbar。

一、引 言

材料的高压状态方程, 对于天体物理、地球物理、材料的强动荷载效应以及聚变研究等, 都是非常重要的。在几万巴的压力下, 材料状态方程的测量, 通常采用静压法; 在几十万到几百万巴的压力区, 一般用化爆或轻气炮等驱动的冲击高压实现。而利用强激光辐照靶材, 可以产生一千万巴 ($\approx 10 \text{ Mbar}$) 以上的极高压冲击波^[1]。这样高的压力, 目前只有在核爆条件下才能获得。因此, 强激光的应用, 为在实验室进行材料高压状态方程测量提供了新的方法。

高功率激光聚焦辐照靶材, 在靶的前表面形成瞬时的高温稠密等离子体。当这种等离子体向真空高速飞散时, 便有反冲动量传入靶内, 形成激光驱动的高压冲击波。当冲击波传播到靶的后表面时, 我们可以观察到靶背面的冲击加热发光。这种发光表征着激光冲击波到达靶背面的时刻, 并携带着有关冲击波性状的信息。因此, 通常可以通过靶背面冲击加热发光信号的观察, 来测量冲击波的速度, 研究冲击波的性状。

以往我们已在 10^{10} W 激光装置上, 用宽度为 0.45 ns、能量为 5 J 的钹玻璃脉冲激光聚焦辐照铝箔靶, 用可见光超快速扫描相机, 拍摄到了比较暗淡的靶背面冲击加热发光信号, 并推算出相应的冲击波压力约为 3 Mbar^[2]。

本文将介绍我们新近在输出功率可达 10^{12} W 的 LF-12 激光装置上进行的激光高压冲击波实验的情况。实验中, 用输出能量为 500 J 左右、脉宽为 1.2 ns 左右的钹玻璃脉冲激光聚焦辐照铝箔靶或铝台阶靶, 靶面激光强度为 $(1-2) \times 10^{14} \text{ W}/\text{cm}^2$ 。用扫描相机拍摄到了清晰的靶背面冲击加热发光信号。在采用由透镜列阵和非球面透镜组成的组合透镜时, 观察到冲击波的平面性有了明显的改善。此外, 还拍摄到铝台阶靶背面的阶梯形发光信号, 据此测出冲击波速度为 $17.6 \mu\text{m}/\text{ns}$, 并推算出相应的冲击波压力为 4.4 Mbar。这个压力是目前用化爆方法在铝中所能达到的最高压力的 4 倍左右。

二、实验条件与实验布局

实验是在高功率激光物理研究实验室的 LF-12 激光装置上进行的。这是一台单路

最高输出功率可达 10^{12} W 的两路磷酸盐钕玻璃激光实验装置^[3]。我们的实验所用的是它的北路输出激光。根据激光参数的实时监测, 输出激光的波长为 $1.054\ \mu\text{m}$, 时间脉冲波形近似于高斯型, 脉冲宽度 (FWHM) 约为 $1.2\ \text{ns}$, 能量约为 $500\ \text{J}$ 。

实验布局如图 1 所示。输出激光光束经靶场伺服反射镜 M_1, M_2 转向, 进入真空靶室, 再经焦距为 340mm , 相对孔径 $f/D = 1.7$ 的非球面透镜或组合透镜 L_1 聚焦, 垂直照明铝箔靶或铝台阶靶正面, 使靶面烧蚀, 产生高压冲击波传入靶内。靶背面的冲击加热发光, 经焦距为 100mm 的成象物镜 L_2 放大 30 倍后, 成象在可见光超快速扫描相机的狭缝上。狭缝前加有若干中性滤光片 F , 用以调节进入相机的光强, 保证相机正常工作。

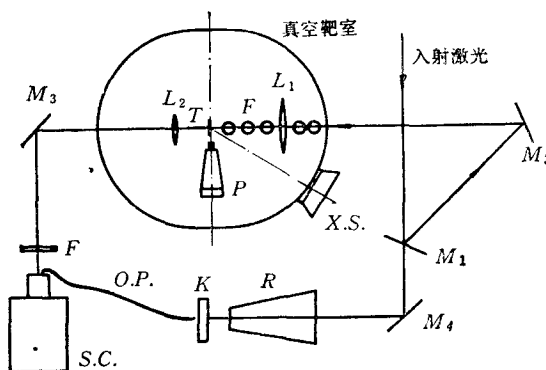


图 1 实验布局示意图 M_1, M_2 为伺服反射镜; M_3, M_4 为反射镜; L_1 为聚焦透镜; L_2 为成象透镜; T 为靶; P 为 X 射线针孔相机; F 为离子收集器; $X.S.$ 为 X 射线能谱仪; F 为中性滤光片; $S.C.$ 为扫描相机; R 为缩孔望远镜; K 为倍频晶体; $O.P.$ 为光纤

输出激光中透过伺服反射镜 M_1 的那一小部分用作参考光。它经过缩孔器缩束后, 由 KDP (邻酸二氢钾) 晶体倍频成绿光, 再由光纤引到扫描相机狭缝上, 为扫描相机记录提供时间基准。

与靶面法线垂直的方向上放置的 X 射线针孔相机, 用来记录靶等离子体发射的 X 射线针孔象, 监测靶面激光光斑和烧蚀面的大小。根据针孔相机的记录, 我们估计出一些实验的靶面激光光斑的直径为 $500\text{—}700\ \mu\text{m}$, 并推算出靶面激光强度为 $(1\text{—}2) \times 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。此外, 还安排了 5 只离子收集器测量飞散离子的动量, 为冲击波压力的测量提供旁证; 1 台 $1\text{—}50\ \text{keV}$ 能段的 X 射线能谱仪, 用来测量靶等离子体发射的 X 射线连续谱, 以推算等离子体电子温度, 并进而估计超热电子对靶的预热程度。

三、实验结果与讨论

图 2 是实验得到的典型的扫描相机记录照片。在这发射实验中, 宽度为 $1.1\ \text{ns}$ 的入射激光脉冲经非球面透镜聚焦成直径 $200\ \mu\text{m}$ 左右的光斑, 辐照在厚度为 $10\ \mu\text{m}$ 的平面铝箔靶上。靶面辐照激光能量为 $70\ \text{J}$, 强度为 $2 \times 10^{14}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 。根据我们的实验光路排布。图 2 中右上方的光带是光纤引进的参考光信号, 左边则是相机狭缝截取的来自靶背面区域的发光信号。经判断证实: 这一信号正是我们希望得到的冲击波信号。

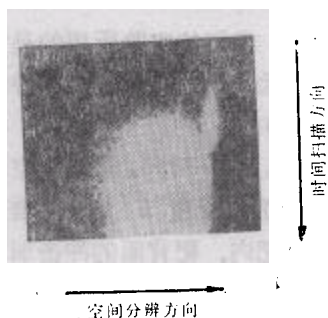


图2 平面铝箔靶背面冲击加热发光的扫描相机记录

值得注意的是图2中的发光信号的前沿,中间部分是超前的,两侧则是滞后的,这表明激光冲击波不是同时到达靶背面,而是中间先到,边缘后到。考虑到入射激光是同时辐照到靶的前表面,而靶的厚度又是均匀的,由此可以推知,靶中的冲击波是中心较强,传播速度较快,边缘较弱,传播速度较慢的凸面冲击波。

高压状态方程的实验测量,要求冲击波是良好的平面波。类似图2这样的凸面冲击波,是不能满足状态方程实验要求的。在激光状态方程实验中,要获得良好的平面冲击波,靶面的辐照激光应该尽可能均匀。为此,LF-12装置配置了专门研制的透镜列阵,把它与常规的非球面透镜结合起来,构成组合透镜。入射激光束经过这种组合透镜聚焦,能实现靶面的大光斑均匀照明^[4]。

为了演示组合透镜均匀照明对改善激光冲击波平面性的效果,我们进行了一组对比实验,图3就是这种实验得到的典型的扫描相机记录照片。两发实验中,入射激光脉冲宽度均为1.2 ns,靶面激光能量为400 J左右,光斑直径约为600 μm ,所用的靶是厚度为30 μm 的平面铝箔。图3(a)是用常规非球面透镜聚焦的结果,得到的仍是中间超前、边缘滞后的明显弯曲的冲击波阵面。图3(b)是用组合透镜照明的结果,得到了相当平直的冲击波阵面。这种平面性明显改善的冲击波,对状态方程的实验测量,将会是十分有利的。

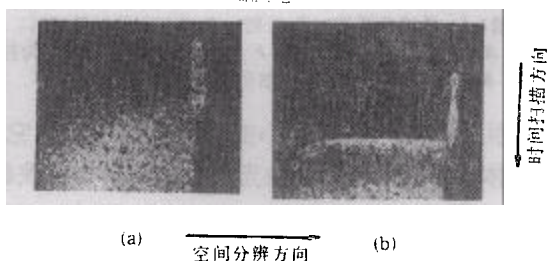


图3 两种聚焦照明方式得到的平面铝箔靶背面冲击加热发光的扫描相机记录
(a)为非球面透镜聚焦照明的结果;(b)为组合透镜聚焦照明的结果

正是由于采用了组合透镜,实现了靶面的均匀照明,获得了平面性比较好的激光冲击波,我们才得以进行了铝台阶靶实验,并用扫描相机记录到了预期的靶背面阶梯形冲击加热发光信号。实验中,入射激光脉冲宽度为1.1 ns,靶面激光能量为400 J,光斑直径约为600 μm ,靶面激光强度约为 $1.2 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 。实验所用铝靶的基板和台阶的厚度均为20 μm 。

图4是扫描相机记录到的阶梯形发光信号。其先、后两个前沿,分别表征着冲击波传播到靶台阶底部和顶部的时刻。它们之间的时间差,就是冲击波在靶台阶中的渡越时间 t 。根据事先测定的靶台阶厚度 d ,很容易求出冲击波在靶台阶中传播的平均速度 $\bar{D} = d/t$ 。在这一发射实验中,测得 $d = 20 \mu\text{m}$, $t = 1.14 \text{ ns}$,于是, $\bar{D} = 17.6 \mu\text{m/ns}$ 。根据铝在较低压力下的冲击绝热线参数^[5],外推估算出相应的冲击波压力为4.4 Mbar,约为目前用化爆方法在铝中获得的最高压力的4倍。

根据同一发射实验用离子收集器等测得的结果,推算出靶面烧蚀压力(它大体上等于

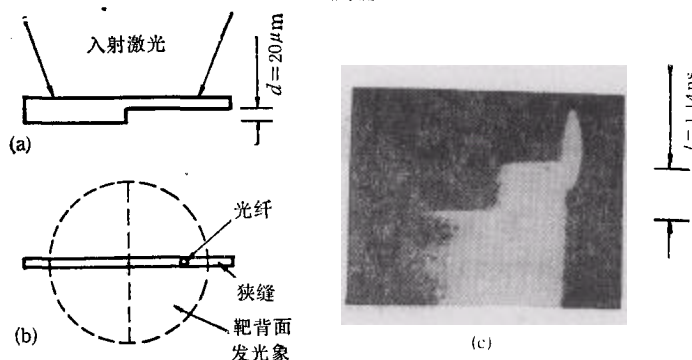


图4 铝台阶靶实验 (a) 为组合透镜聚焦照明铝台阶靶; (b) 为扫描相机狭缝上的靶背面发光象; (c) 为台阶靶背面冲击加热发光的扫描相机记录

冲击波压力 P_s 约为 5.0 Mbar, 而由一维流体动力学程序计算机数值模拟给出的冲击波压力 P (以 Mbar 为单位) 与吸收激光功率密度 I_a (以 10^{14} W/cm 2 为单位) 的定标关系¹⁾ $P \approx 10 I_a^{0.7}$, 并取激光吸收效率 $\eta_a = I_a/I_0 \approx 30\%$ (I_0 为入射激光功率密度), 估算出相应的冲击波压力 P 约为 4.9 Mbar. 这些结果均与这里的扫描相机的测量结果十分接近.

感谢 LF-12 装置运行组和入射激光参数测量组在实验中的通力配合. 感谢何锦涛、滕永华等为实验提供了良好的铝台阶靶. 我们还对常铁强、赖东显、马民勋等所做的理论工作和多次有益的讨论表示感谢.

- [1] R. J. Trainor *et al.*, UCRL-52562(1978).
- [2] Gu Yuan *et al.*, in *Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects*, Science Press, Beijing, China, (1986), p. 131.
- [3] S. I. Anisimov *et al.*, *Sov. Phys. Usp.*, 27, 3(1984), 181.
- [4] 邓锡铭等, 中国激光, 12(1984), 257.
- [5] R. G. McQueen *et al.*, in *High Velocity Impact Phenomena*, ed. R. Kinslow, Academic Press, New York and London, (1970), ch. 7.

EXPERIMENTAL OBSERVATION OF LASER DRIVEN HIGH PRESSURE SHOCK WAVES

GU YUAN NI YUAN-LONG WANG YONG-GANG MAO CHU-SHENG WU FENG-CHUN

WU JIANG ZHU JIAN WAN BING-GEN

(Institute of Engineering Physics, Shanghai)

ABSTRACT

This paper presents the experimental records of the light emitting from heating luminescence at the back surface of aluminium foil or stepped targets, obtained by an optical ultra-fast speed streak camera. The target was irradiated by a focused high power laser beam with 500 J output energy in 1.2 ns FWHM pulse. The results showed that the degree of flatness of the laser driven shock wave was obviously improved due to application of the special combined lens. In these experiments the shock wave velocity in the step of aluminium target was obtained to be 17.6 m/ns, corresponding to shock wave pressure of 4.4 Mbar.

1) 赖东显等, 私人通信, 1987 年.