

小型激光器驱动飞片冲击引爆炸药实验研究

谷卓伟, 孙承纬, 苏小勇
(中物院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 利用小型激光器驱动飞片技术成功起爆了 PETN 安全炸药。详细介绍了实验的原理、过程、实验装置、测试方法和实验结果。实验中, 利用能量 205mJ、激光脉宽 9.5ns 的激光脉冲, 驱动厚度 5.5 μ m、直径约 1.0mm 铝飞片冲击起爆了密度 1.2g/cm³ 的压装 PETN 炸药, 冲击速度约 3~4.2km/s, 压力脉宽约 2.08ns。用简单的冲击起爆判据 ($p^2\tau = \text{常数}$) 对实验结果进行了分析, 结果表明: 实验结果是合理的, 与理论分析是一致的。

关键词: 小型激光器; 激光驱动飞片; 冲击起爆; 炸药

* 中图分类号: O347.1; O383 文献标识码: A

1 引言

当激光束辐照在透明窗口后表面的金属膜时, 沉积的激光能量将烧蚀金属膜, 产生强应力波并能够加速金属或塑料飞片^[1]。一束脉宽 1~10ns、强度 10⁹W/cm² 量级的激光束辐照附着在透明窗口后表面的金属膜时, 几微米厚的飞片能够被加速到 5km/s 以上的高速度^[2]。目前, 利用小型的固体脉冲激光器即可完成上述实验, 这就是小型激光器驱动飞片技术。

自 70 年代以来, 人们对激光引爆炸药进行了大量的理论和实验研究, 发现激光引爆炸药主要有三种方式: 一是激光直接辐照引爆炸药; 二是激光辐照表面盖有金属的炸药; 三是利用激光驱动飞片冲击引爆炸药。1995 年, L. de Yong^[3] 在对上述三种引爆机制进行了分析和比较之后得出结论: 在激光引爆炸药的各种引爆机制中, 激光驱动飞片冲击引爆炸药是最安全可行的。

自 90 年代始, 中物院流体物理研究所对小型激光器驱动飞片引爆安全炸药技术进行了一些探索性的研究工作, 获得了一些很有价值的研究成果^[4]。1999 年 11 月, 在国内首次利用小型激光器驱动飞片技术成功引爆 PETN 安全炸药。下面详细介绍实验的过程和结果。

2 激光驱动飞片的速度测量

图 1 是实验的布置图。实验中采用小型固体 YAG 激光器, 体积 20cm×20cm×80cm, 波长 1.06 μ m, 脉宽 9~10ns。单脉冲最大能量 1J。采用能量计监测激光脉冲能量, 利用光电探测器监测脉冲宽度并输入到示波器作为触发信号。光束经一焦距为 200mm 的会聚透镜聚焦到飞片上。飞片材料为商用铝膜, 将铝膜用真空脂或硅油紧密粘贴在透明窗口上, 窗口材料采用 K9 玻璃, 当激光束聚焦到铝膜上, 激光烧蚀一部分膜层并推动余下部分, 即飞片飞行一段距离后撞击到石英晶体上。当飞片撞击到石英晶体表面时将产生一个压电信号, 利用测得的飞片的飞行时间和距离, 就可得到飞片的平均飞行速度

$$v = l / (t_1 - t_0) \quad (1)$$

式中: l 为飞行腔长; t_0 为出光时刻; t_1 为石英计信号前沿。这里忽略飞片的飞行姿态及可能产生的气垫对信号起点的影响。

飞片速度测量的相对误差可以由下式得到

* 收稿日期: 2001-02-22; 修回日期: 2001-05-28
作者简介: 谷卓伟(1969—), 男, 博士研究生。

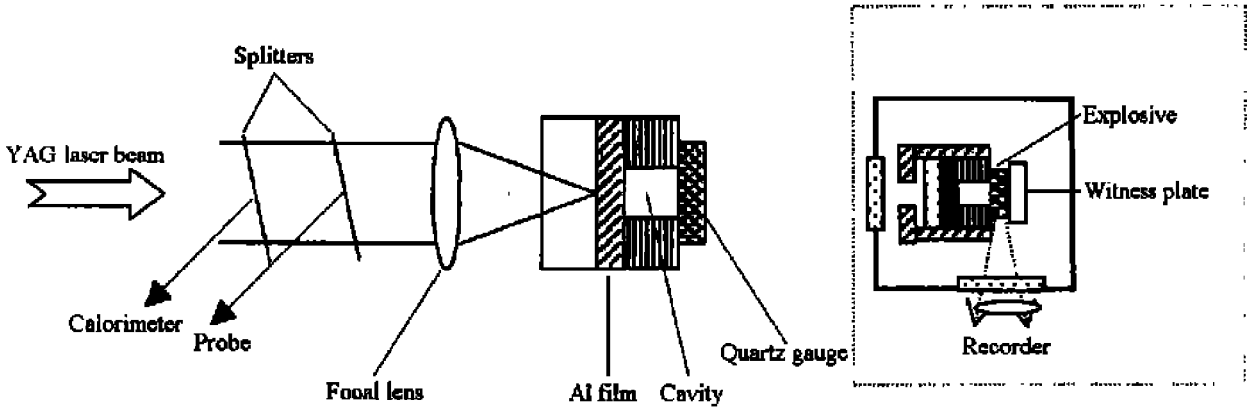


图 1 激光驱动飞片的速度测量及引爆炸药实验布置图

Fig.1 Set up of the velocity measurement and detonating explosive by laser driven flyer

$$\Delta v/v = \Delta l/l + \Delta t/t \tag{2}$$

式中: l 为飞片飞行距离; Δl 为飞行距离的测量精度, 这里为 0.01mm; t 为飞片的飞行时间; Δt 为飞行时间的测量精度, 这里为 1ns。

石英计的设计采用短路保护环式^[5], 尺寸 $\Phi 10\text{mm} \times 1\text{mm}$, 响应时间 $< 1\text{ns}$ 。在实验测量中, 为保护石英计, 在计前加一 $\Phi 10\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ 的铜片。铜片与石英计之间用少量真空脂粘贴, 这一薄层将延缓石英计表面的机械运动, 因此, 实验测得的石英信号其上升沿要缓一些。

实验中成功驱动了厚度 $5.5\mu\text{m}$ 的铝飞片, 飞片直径约 1.0mm, 最高速度达到 6.6km/s。图 2 是实验记录的原始信号, 图中下方是光脉冲信号, 上面是石英计信号。图 3 是实验测得的厚度 $5.5\mu\text{m}$ 的飞片的平均速度与能量密度 Ψ 的关系。表 1 是实验的参数及测量数据。

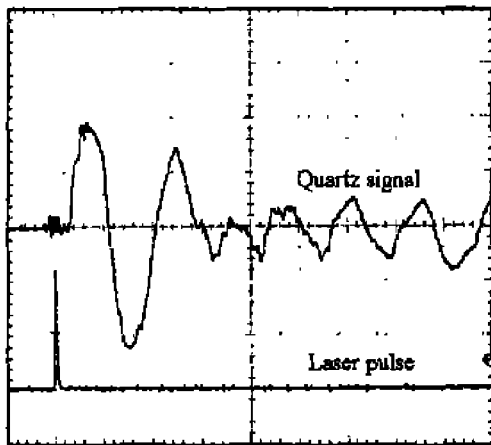


图 2 实验记录的原始信号
Fig.2 Typical signals of experiment

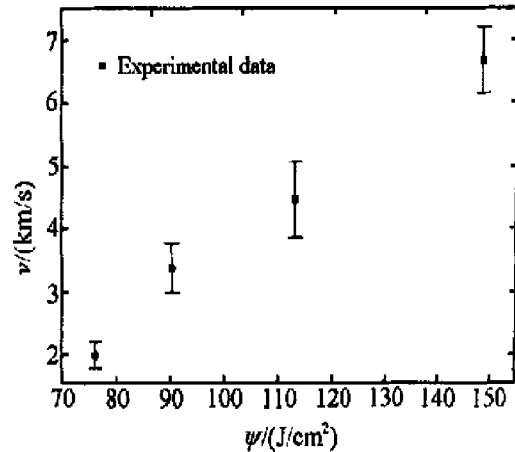


图 3 实验得到的厚度 $5.5\mu\text{m}$ 的飞片速度
Fig.3 Experimental results of $5.5\mu\text{m}$ thick flyer

表 1 实验参数及数据

Table 1 Flyer parameters and experimental data

实验号	激光能量/mJ	激光脉宽/ns	飞片速度/(km/s)	飞行距离/mm	$(\Delta v/v)/(\%)$
1	149.5	11.5	2.0	0.1	10.9
2	177.2	9.5	3.4	0.1	11.7
3	222.2	9.0	4.4	0.1	13.8
4	291.0	9.0	6.6	0.3	7.8

3 激光驱动飞片引爆 PETN 炸药

激光驱动飞片引爆炸药的实验装置如图 1 所示。炸药装置放置在一个带窗口的爆炸容器中,飞片采用铝材料,厚度为 $5.5\mu\text{m}$,飞片飞行距离 0.1mm 。炸药采用密度 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的细颗粒压装 PETN 炸药,尺寸 $\Phi 5\text{mm} \times 5\text{mm}$,药柱后放置一块厚度 10mm 的验证钢板,材料为 45[#] 钢。实验中,利用小型固体激光器产生一束激光脉冲,能量 205mJ ,脉冲宽度 9.5ns ,立即引爆了 PETN 炸药。炸药在验证板上冲击出一个直径 5.3mm 、深度约 0.5mm 的圆坑,坑的边缘尖锐、底部十分平滑,如图 4 所示,从验证板上的冲击成坑可以断定,炸药实现了正常爆轰。

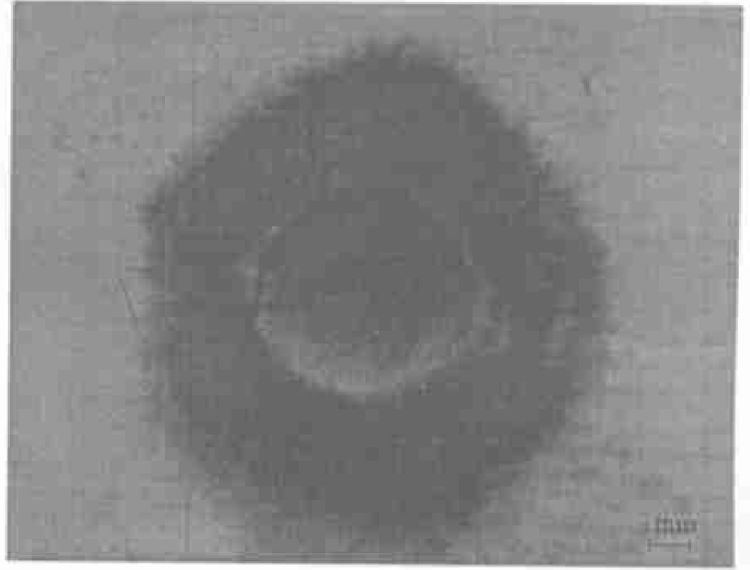


图 4 激光驱动飞片起爆炸药后在验证板上的冲击成坑
Fig.4 The hole impacted by laser driven flyer detonate explode

4 激光驱动飞片引爆炸药的简单分析

用简单的冲击起爆判据 $p^2 \tau = \text{const}$,可以估算炸药的冲击起爆阈值,但是在超短应力波的情况下,这种判断得到了起爆阈值比实际值要低一些。

忽略冲击引爆的面积效应,炸药冲击引爆判据可写为

$$p_e^2 \tau \geq K \quad (3)$$

式中: p_e 是炸药中的入射冲击压力, τ 是压力脉宽, K 是实验常数。 p_e 和 τ 由未反应炸药的冲击绝热线、应力波后的粒子速度、飞片厚度和飞片材料的声速决定,即

$$p_e = \rho_e (c_e + s_e u_e) u_e \quad \tau = 2 \delta / c_f \quad (4)$$

式中: ρ_e 是炸药的密度, c_e 和 s_e 是炸药的 Hugoniot 系数, u_e 是靶中冲击波后的粒子速度, δ 是飞片厚度, c_f 是飞片材料的声速。实验中飞片材料为铝,其 Hugoniot 关系为: $D = 5.25 + 1.39u$, km/s 。

炸药材料为密度 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的 PETN 炸药,其 Hugoniot 关系为: $D = 0.89 + 2.05u$, km/s 。

当已知飞片和靶材料的 Hugoniot 关系时,由飞片撞击速度 v ,就可以得到靶材料的波后粒子速度

$$u_e = (-B + \sqrt{B^2 - 4AC}) / 2A \quad (5)$$

式中: $A = \rho_{of} S_f$, $B = -\rho_{of} c_{of} - 2S_f v \rho_{of} - \rho_{oe} D_e$, $C = \rho_{of} v (S_f v + c_{of})$; ρ_{of} 、 S_f 、 c_{of} 分别为飞片材料的初始密度、Hugoniot 系数和体声速; ρ_{oe} 、 D_e 分别为炸药的初始密度和冲击波速度。

得到波后粒子速度 u_e 后,由(4)式可以得到靶中的冲击压力和压力脉宽。

实验中,测量激光脉冲能量为 205mJ ,脉冲宽度 9.5ns 。由于飞片尺寸较小(直径约 1.0mm),不易精确测定。因此,由已知厚度 $5.5\mu\text{m}$ 的铝飞片的能量密度和速度的关系,就可以得到飞片的冲击速度为 $3 \sim 4.2\text{km}/\text{s}$ 。由(4)式得到炸药中产生的压力幅度

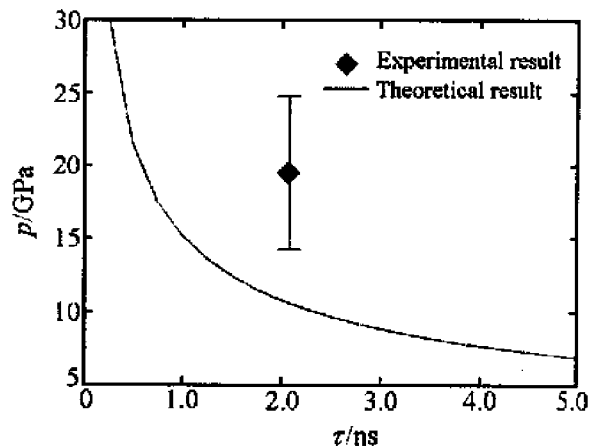


图 5 激光驱动飞片冲击起爆炸药的实验结果
Fig.5 The experimental result of laser driven flyer detonating explode

约为 14.23 ~ 24.5GPa, 压力脉宽为 2.08ns。

图 5 是激光驱动飞片冲击起爆炸药的实验结果。图中曲线为利用 $p^2 \tau = K$ 得到的密度为 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的 PETN 炸药的冲击起爆曲线。对于密度 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 的 PETN 炸药, 判据中 K 取为 $0.23\text{MPa}^2 \cdot \text{s}^{[6]}$ 。

由图 5 可以看出: 实验点在曲线的上部, 实验结果符合冲击起爆判据 $p^2 \tau \geq K$ 。在利用激光驱动飞片引爆炸药的研究中, 由于飞片的面积较小、脉冲很短, 激光驱动小飞片引爆炸药的 $p^2 \tau$ 值可能比电炮驱动的大尺寸飞片情形高 10 ~ 20 倍^[4], 因此, 使用较高速度的飞片可减少因其尺寸较小带来的不利影响。

在测试方法上得到刘仓理、张宁、袁万宗研究员的指导, 参加实验的还有罗利军、李晓兰、李建明、廉敬阳、张可星等同志, 在此深表谢意。

参考文献:

- [1] Trott W M, Meeks K D. High-power Nd:Glass Laser Transmission Through Optical Fibers and its Use in Acceleration of Thin Foil Targets [J]. J Appl Phys, 1990, 67(7): 3297-3301.
- [2] Paisley D L. Laser-driven Miniature Flyer Plates for Shock Initiation of Secondary Explosives [R]. DE89-016587, 1989.
- [3] de Yong L, Nguyen T, Waschl J. Laser Ignition of Explosives, Pyrotechnics and Propellants; A Review [R]. AD-A299465, 1996.
- [4] 孙承伟. 激光驱动飞片冲击引爆炸药的计算 [J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(3): 471-476.
- [5] 谷卓伟, 孙承伟, 刘仓理, 等. 小型激光器驱动飞片的平均速度测量研究 [J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(3): 309-312.
- [6] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 108.

Experimental Research on Impacting and Detonating Explosive by Mini Size Laser-Driven-Flyer

GU Zhuo-wei, SUN Cheng-wei, SU Xiao-yong

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: The PETN explosive is detonated by mini size laser-driven-flyer. It is the first time to use the technique domestically. The experimental principle, process, set-up, measurement method and results are introduced in detail in this paper. In the experiments, 205mJ, 9.5ns laser pulse is used. A 5.5 μm thickness, 1.0mm diameter aluminum flyer is driven and the PETN explosive of density $\rho = 1.2\text{g}/\text{cm}^3$ is detonated. The impact velocity is about 3 ~ 4.2km/s, pressure pulse is about 2.08ns. A simple experimental results analysis has been done by using criterion of $p^2 \tau = \text{const}$. The analysis shows that the experimental results is reasonable and is in good agreement with the analytical prediction.

Key words: mini size laser; laser-driven-flyer; impacting and detonating; explosive