

# 激光引爆起爆药的机理及其 爆轰流场的干涉法研究

闫大鹏 苗鹏程 王海林 贺安之

(华东工学院应用物理系)

**摘要** 本文从实验上研究小型脉冲 YAG 激光引爆或引燃起爆药的可能性,在理论上,从激光热引爆的机理简述了激光引燃或引爆的判据。并采用大口径长程 F-P 型干涉仪,外调制序列脉冲激光源和高速记录装置,获得了起爆药爆轰流场和燃烧温度场的时间序列干涉图,定量计算了爆轰冲击波的传播速度。

**关键词** 干涉术 点火 测量

## 一、引言

爆轰技术在国防、工程建设和科学研究中获得了日益广泛的应用,但到目前为止,仍有一些基本问题尚未解决。由于爆轰的瞬时性、破坏性和危险性,人们通常是使用高速摄影和高速阴影等技术进行观察和研究爆轰现象<sup>[1~2]</sup>。利用非接触的干涉法来显示起爆药的爆轰产物流场或燃烧温度场,定量分析其特性如速度、密度、温度等的分布,是一个急待解决的问题。

引爆起爆药的方式有微波辐射<sup>[3]</sup>,放电闪光<sup>[4]</sup>,冲击波引爆<sup>[5]</sup>等。随着科学技术的发展,人们对引爆的瞬时性、同时性、可靠性和安全性的要求更高,激光引爆<sup>[6~9]</sup>已成为一种新的引爆方式,并利用加热或冲击的机理来解释激光的引爆机理<sup>[10]</sup>。

本文用一台由蓄电池供电的小型脉冲 YAG 激光器来引爆起爆药,在同样的激光泵浦电压下,用调 Q 和自由振荡两种不同方式工作,实验结果表明:在较大的泵浦电压下,两种工作方式的脉冲 YAG 激光都能引爆起爆药,降低泵浦电压到一定值时,调 Q 工作方式的脉冲 YAG 激光不能引爆或引燃起爆药,而自由振荡方式的脉冲 YAG 激光能引燃起爆药。由此我们根据热起爆的机理给出了激光能量引爆或引燃的判据。为了进一步研究起爆药爆轰或燃烧过程的特性,本文采用了外调制序列脉冲激光光源作为探测光源,大口径长程 F-P 型干涉仪<sup>[11]</sup>作为流场显示的仪器,扫描式高速摄影仪作为记录装置,获得了激光引爆起爆药爆轰流场的时间序列干涉图和激光引燃起爆药的燃烧温度场时间序列干涉图,解决了起爆药爆轰流场的激光干涉法显示问题,并从爆轰流场的时间序列干涉图中定量计算了冲击波传播的速度。

## 二、实验装置

实验装置如图1所示,连续 He-Ne 激光经声光调制器的序列脉冲信号调制后,产生

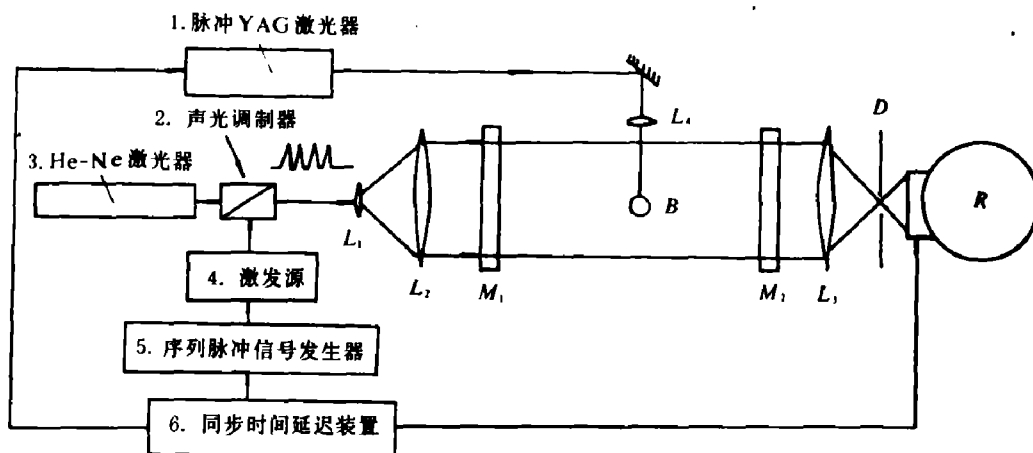


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement

1. Pulse YAG laser; 2. Acoustic-optical modulator; 3. He-Ne laser; 4. Driver power;  
5. Generator of serial-pulse signal; 6. Synchronous time-delay mechanism

脉冲宽度为  $0.1\mu\text{s}\sim 100\mu\text{s}$ , 脉冲间隔为  $1\mu\text{s}\sim \text{ms}$  量级连续可调的序列脉冲激光串, 该序列脉冲激光经  $L_1$  透镜扩束和  $L_2$  透镜准直后形成一视场为  $200\text{mm}$  直径的平行光, 进入间隔为  $5\text{m}$  的分离式双镜  $M_1$  和  $M_2$  系统产生干涉, 由  $L_3$  成象透镜, 把干涉图成象在扫描式高速摄影仪内鼓轮的底片上, 可记录时间序列干涉图。

起爆药为我校化工学院提供的, 其药剂是 S-D 共晶药, 导电药和酸性乙炔银, 制作过程中掺入  $2\sim 3\%$  的 NC, 由醋酸丁酯粘合剂在自然条件下粘成小球形状, 药量为  $8.0\text{mg}$ 。

引爆起爆药所用的激光器是一台小型的脉冲 YAG 激光器, 其工作物质是  $\varnothing 4\times 45\text{mm}$  的优质 Nd:YAG 棒, 供电系统为 2 个小型的高效能蓄电池, 激光器和电源的总重量小于  $1\text{kg}$ , 最大的输出能量为  $80\text{mJ}$ , 波长为  $1.06\mu\text{m}$ , 在自由振荡方式下, 脉宽为  $200\mu\text{s}$ , 在染料调 Q 下, 脉冲宽度为  $20\text{ns}$ , 重复频率为  $5\text{次/分}$ , 脉冲 YAG 激光经  $L_4$  透镜聚焦在起爆药上引爆。

扫描式高速摄影仪处于等待状态, 其快门的打开和关闭, 以及单脉冲 YAG 激光和序列脉冲 He-Ne 激光的输出由同步延时器控制。

由  $M_1$  与  $M_2$  组成的分离式大口径长程 F-P 干涉仪<sup>[1]</sup>, 其特点是光路简单, 共光路分离式结构, 防震性能好, 适用于恶劣环境条件下的瞬态流场测试。当双镜  $M_1$  与  $M_2$  之间的夹角  $\theta$  很小时, 位相差取决于

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_0 d \quad (1)$$

选择双镜的内表面反射率为  $60\%$ , 产生以双光束干涉为主的干涉条纹。(1)式中  $d$  为  $M_1$

与  $M_2$  之间的距离,  $n_0$  为空气折射率。若  $M_1$  与  $M_2$  之间没有被测流场存在, 干涉条纹是平行的, 等间距的, 其间距表达式为

$$s = \frac{\lambda}{2n_0\theta} \quad (2)$$

若  $M_1$  与  $M_2$  之间存在被测流场, 则引起干涉条纹的位移, 条纹的变化量  $e(y)$  与被测场折射率  $n(x, y, z)$  之间的关系是

$$e(y) = \frac{2}{\lambda} \int_{-r_0}^{r_0} [n(x, y, z) - n_0] dz \quad (3)$$

假定被测流场是轴对称的, 则(3)式经过 Abel 变换<sup>[12]</sup>, 有

$$[n(x, y, z) - n_0] = -\frac{\lambda}{2\pi} \int_r^{r_0} \frac{de(y)/dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \quad (4)$$

由(4)式可知, 通过计算机图像处理技术, 自动判读干涉条纹的位移量  $e(y)$  和计算机软件可定量计算被测流场的折射率分布。

### 三、实验结果和讨论

#### 1. 脉冲激光引爆或引燃起爆药的实验及机理

实验上, 我们首先用能量计测量染料调  $Q$  状态的 YAG 激光能量, 同时用硅光二极管接收、记忆示波器观察脉宽, 其能量和脉宽的稳定性在 99%。引爆方式首先是在调  $Q$  状态下引爆起爆药, 接着去掉染料盒, 在自由振荡状态下引爆, 实验结果表明, 在调  $Q$  状态输出能量为 80mJ 的情况下, 能引爆起爆药, 去掉染料盒变为自由振荡状态也不例外, 但降低激光的泵浦电压, 当调  $Q$  激光的输出能量降到一定值时, 不能引爆也不能引燃起爆药; 而去掉染料盒变为自由振荡方式, 却能引爆或引燃药剂, 我们实验了 S-D 共晶药, 导电药和酸性乙炔银, 具体结果见表 1、表 2 和表 3 所示。

表 1 S-D 共晶药的实验结果

Table 1 The experimental result of S-D eutectic explosives

能 量 工 作 方 式	80mJ	60mJ	40mJ	20mJ	10mJ
调 Q	引 爆	引 爆	不 能	不 能	不 能
自由振荡	引 爆	引 爆	引 爆	引 燃	引 燃

表 2 导电药的实验结果

Table 2 The experimental result of conductive explosives

能 量 工 作 方 式	80mJ	60mJ	40mJ	20mJ	10mJ
调 Q	引 爆	不 能	不 能	不 能	不 能
自由振荡	引 爆	引 爆	引 燃	引 燃	不 能

表 3 酸性乙炔银的实验结果

Table 3 The experimental result of acid silver acetylide

能量 工作 方式 结果	80mJ	60mJ	40mJ	20mJ	10mJ
调 Q	引 爆	引 爆	不 能	不 能	不 能
自由振荡	引 爆	引 爆	引 爆	引 燃	引 燃

注：表 1、表 2 和表 3 中的激光能量是在调 Q 工作方式下测量的结果。

由上述结果可见，小型 YAG 激光能够引爆起爆药，而自由振荡工作方式的引爆或引燃效果比调 Q 工作方式好，这是因为其输出能量比调 Q 工作方式大，这说明了激光引爆起爆药与激光的输出能量和作用时间有密切的关系，同时也进一步验证了激光作用于起爆药是加热。

根据热起爆机理，假定药剂充满半无限空间，初始温度为  $T_0$ ，药剂表面是绝热，也没有药剂颗粒的机械运动，除热传导外，不考虑其他热损失，药剂对激光的吸收系数  $\alpha$  以及其他化学动力学诸参数都是常数，还设药剂的反射系数  $R_r = 0$ ，则药剂被激光照射后的热传导方程为<sup>[10]</sup>

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \rho Q z e^{-\alpha x / \mu} + \alpha I(t) e^{-\alpha x} \tag{5}$$

式中  $T$ 、 $k$ 、 $z$  和  $E_{活}$  分别为起爆药的温度、热传导系数、频率因子和热活化能， $I(t)$  是药剂表面处激光束能量密度， $R$  为气体常数， $t$  为时间。

初始条件  $T(x, 0) = T_0$  (6)

边界条件  $\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0$  (7)

为了简化分析，一是假定激光呈矩形脉冲，能量密度为  $k\alpha A$ ，脉宽为  $t_0$ ，即无量纲的激光通量  $f(\tau)$  为

$$f(\tau) = \frac{I(t)}{k\alpha} = A[H(\tau) - H(\tau - \tau_0)] \tag{8}$$

这里  $\tau = \frac{k\alpha^2}{\rho c} t$  是无量纲时间， $H(\tau)$  是 Heaviside 函数，定义为

$$H(\tau) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \tag{9}$$

二是假定在激光加热阶段，忽略药剂的反应放热项，则(5)式、(6)式和(7)式化简为

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + f(\tau)e^{-\xi} \tag{10}$$

$$\tau = 0 \quad u = 0 \quad (\xi > 0) \tag{11}$$

$$\xi = 0 \quad \frac{\partial u}{\partial \xi} = 0 \quad (\tau > 0) \tag{12}$$

其中， $u = T - T_0$ 。对(10)式作 Laplace 变换，有

$$u(0, \tau) = A \left[ \frac{2}{\sqrt{\pi}} (\sqrt{\tau} - \sqrt{\tau - \tau_0}) + y_0 (\sqrt{\tau} - y_0 (\sqrt{\tau - \tau_0})) \right] \quad (13)$$

其中,

$$y_0(x) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{x}{1 + \frac{\sqrt{\pi}}{2} x} \quad (14)$$

$u(0, \tau)$  是药剂表面的温度变化. 同时在激光照射之后的药剂反应阶段, 把(5)式中热流损失项用激光加热阶段的解(13)式来近似, 即令

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\rho c}{k} \frac{du(0, \tau)}{d\tau} \quad (15)$$

并对药剂的反应项作 Франк - Камецкий 近似<sup>[12]</sup>

$$-\frac{E_{\text{活}}}{RT} \doteq -\frac{E_{\text{活}}}{RT_0} (2T_0 - T) \quad (16)$$

其中  $T_0 = u(0, \tau_0) + T_0$ . 则我们得到起爆药的临界爆炸温度  $T_{\text{临}}$  为

$$T_{\text{临}} \doteq \frac{E_{\text{活}}}{R} \left[ \ln \frac{\pi Q \rho c R}{2k E_{\text{活}} \alpha^2} \right]^{-1} \quad (17)$$

和激光临界引爆的能量密度  $I_{\text{临}}$  为

$$I_{\text{临}} \doteq \frac{\rho c}{\alpha} T_{\text{临}} \left( 1 + \frac{\alpha}{2} \sqrt{\pi D \tau_0} \right) \quad (18)$$

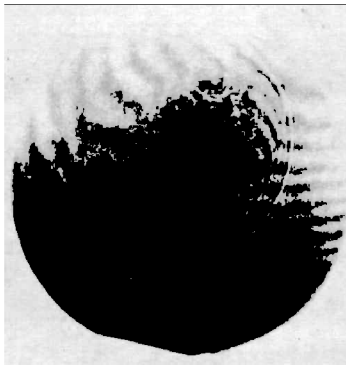
式中,  $D = k/\rho c$  是热扩散系数. 则激光对起爆药的引爆或引燃判据可写为

$$I(t) \geq I_{\text{临}} \quad \text{引爆} \quad (19)$$

$$I(t) < I_{\text{临}} \quad \text{引燃} \quad (20)$$

## 2. 起爆药爆炸和燃烧过程的时间序列干涉法显示及其爆轰冲击波速度的测量

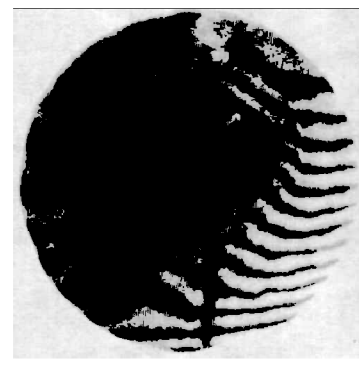
我们用图1所示的实验装置来显示激光引爆起爆药所产生的爆轰流场和引燃起爆药所产生的温度流场, 用脉冲宽度为  $0.1 \mu\text{s}$ , 间隔为  $1 \mu\text{s}$  的序列 He-Ne 激光探测, 获得起爆药爆轰建立过程的时间序列干涉图如图2所示; 用脉宽为  $1 \mu\text{s}$ , 间隔为  $10 \mu\text{s}$  的序列脉冲 He-Ne 激光探测获得起爆药起始燃烧过程的时间序列干涉如图3所示。



(1)



(2)



(3)

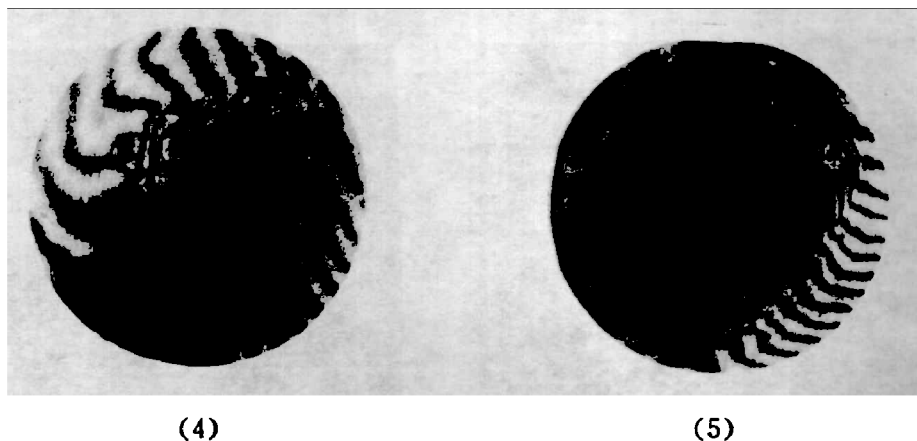


图 2 起爆药爆轰流场的时间序列干涉图

Fig. 2 Serial-time interferograms of the explosive flow field for primary high explosive

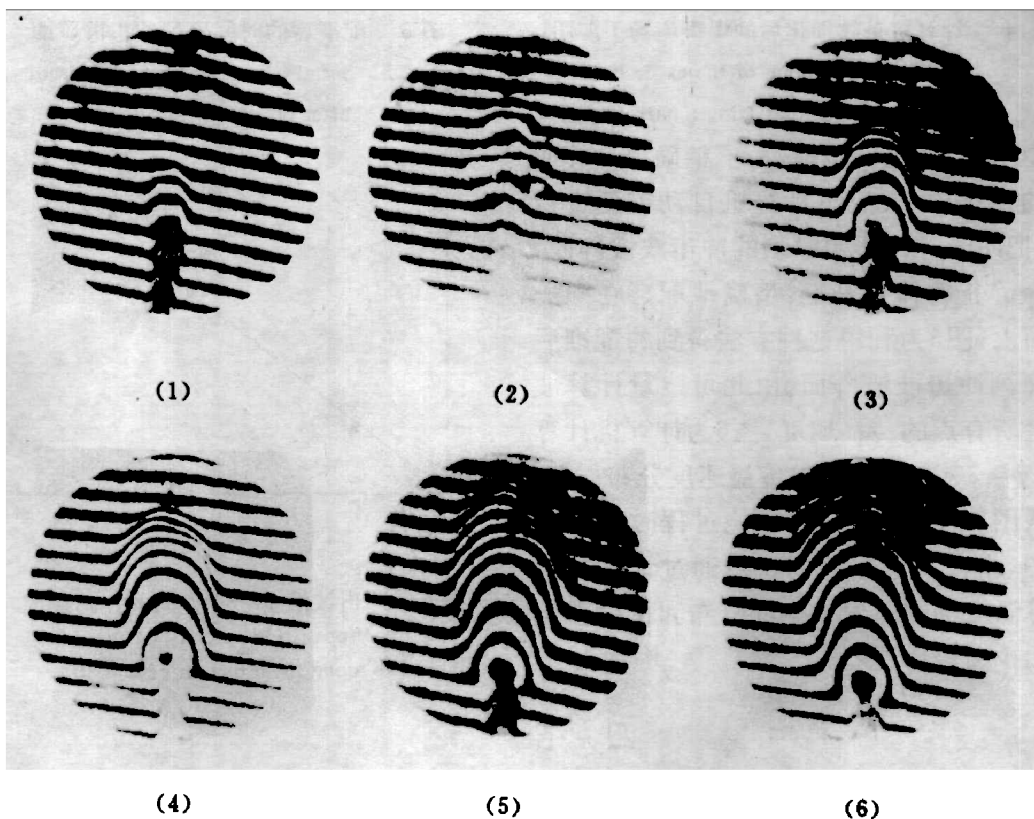


图 3 起爆药燃烧过程温度场的时间序列干涉图

Fig. 3 Serial-time interferograms of the temperature field for primary high explosive in combustion process

为了从所获取的起爆药爆轰建立过程的时间序列干涉图中定量计算冲击波的传播速度,我们先用计算机图象处理技术细化爆轰流场的干涉条纹,图4为细化后爆轰流场的时间序列干涉图之一。从条纹细化后的干涉图,根据双三次多结点插值样条函数<sup>[14]</sup>,把爆轰冲击波引起干涉条纹的突变点拟合起来,重建冲击波波阵面,并把这些时间序列波阵面从



图4 计算机条纹细化后的爆轰流场干涉图  
Fig. 4 The interferogram of the explosive flow field after computer fringes narrowed

干涉图中提出。进一步地,为了精确地计算冲击波的速度,本文应用计算机自动校正进行配准,把同一过程不同时刻的冲击波波阵面,以某一静止物体为基准,精确地配准在同一幅画面上,图5为利用这种方法得到的配准后时间序列冲击波波阵面。由此可定量计算波阵面上所有点的传播速度,图6为计算机计算的,沿 $\varphi=30^\circ$ 方向的径向传播速度分布。

从图3的起爆药起始燃烧过程时间序列干涉图,由公式(4),我们还可通过计算机定量计算温度场的折射率空间分布和折射率随时间变化的情况。

#### 四、结 论

本文从理论上和实验上研究了小型脉冲YAG激光引爆起爆药的机理和可能性,并利用时间序列干涉法显示起爆药的爆轰流场和起始燃烧过程,理论和实验结果表明:

1、小型脉冲YAG激光能够引爆起爆药,在同样的泵浦电压下,自由振荡方式的引爆效果比调Q工作方式好。

2、激光引爆起爆药,主要取决于激光的输出能量,对于这种低功能的脉冲激光,其引爆的机理主要是加热。

3、本文所采用的外调制序列脉冲He-Ne激光光源,大口径长程分离式F-P型干涉仪和扫描式高速摄影仪能够用于起爆药爆轰流场和燃烧温度场的时间序列干涉显示。

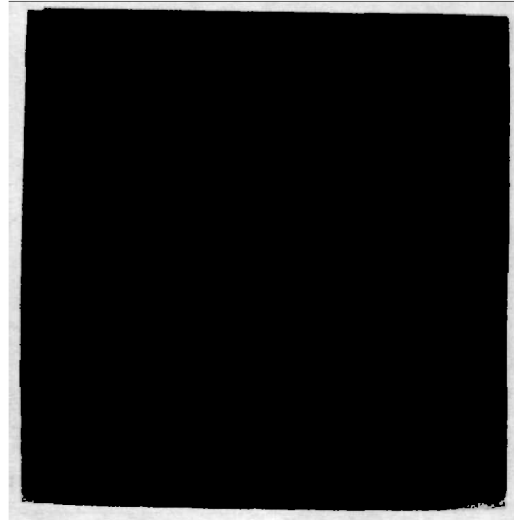


图5 配准后的时间序列冲击波阵面  
Fig. 5 Serial-time shock wave front after optical registration.

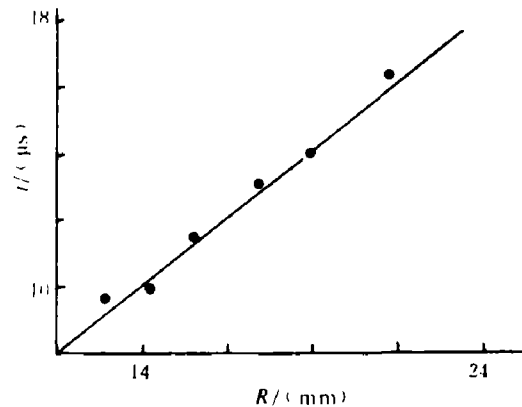


图6 冲击波沿 $\varphi=30^\circ$ 方向的传播速度  
Fig. 6 Propagation velocity of the shock wave along the direction of  $\varphi=30^\circ$

## 4、利用计算机图像处理技术,实现了起爆药爆轰冲击波图像的自动处理和定量计算

致谢:本文实验工作得到沈瑞琪博士帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Shozo Fujiwara, Yoza kakudate et al, *Journal of the Industrial Explosive Society*, (Japan), 45(2)(1984), 98.
- [2] Yuichi Nakamura, Hideo Matsuo, *Journal of the Industrial Explosive Society*, (Japan), 41(2) (1980), 106.
- [3] Kazuo Hasue, Masami Tanabe et al, *Journal of the Industrial Explosive Society*, (Japan), 40(2) (1985), 87.
- [4] McAuslan, J., *Proc. Roy. Soc., A*, 246, (1958), 248.
- [5] Horning, H. C., Kury, J. W., etc, *Proceedings of the 11th Inter. Pyrotechnics Seminar* (1986).
- [6] 史山群编著, 国外火工品, 北京, 国防工业出版社, (1977), 177—185.
- [7] 孙承纬等, 爆炸与冲击, 1(1) (1981), 84.
- [8] Yang, L. C., Menichelli, V. J., *Appl. Phys. Lett.*, 19(11) (1971).
- [9] Yang, L. C. etc, *National Defense*, 58(322) (1974).
- [10] Robert J. Harrach, *J. Appl. Phys.* 47(6) (1976) 2473—2482.
- [11] He Anzhi, Yan Dapeng etc, *Optical Engineering*, 27(10) (1988), 841.
- [12] Goulard, R., *Combustion Measurements*, Academic press, New York. (1976) 226—244.
- [13] Шмануэль, Н. М., 化学动力学, (陈国亮等译), 上海科学出版社, (1962) 276—278.
- [14] 齐东旭, 计算数学, 3(1982), 244.

## RESEARCH ON THE MECHANISM OF DETONATION OF THE PRIMARY HIGH EXPLOSIVE BY LASER AND THE INTERFEROMETRY OF THE EXPLOSION FLOW FIELD

Yan Dapeng, Miao Pengcheng, Wang Hailin, He Anzhi  
(Department of Applied Physics, East China Institute of Technology)

**ABSTRACT** This paper studies experimentally the probability with a feeble YAG laser pulse to detonate or ignite the primary high explosive, and describes briefly the criteria of laser ignition or detonation from the point of view of the theory of laser heat detonation mechanism. By using large-aperture and long-path Fabry-Perot interferometer, serial-pulsed He-Ne laser and high speed record device, the time-serial interferograms of the explosive flow field and the combustion temperature field are obtained. With computer image processing, the propagation velocity of the shock wave is calculated quantitatively.

**KEY WORDS** interferometry, ignition, measurement.