

起爆药爆轰场和燃烧场的干涉法 显示及其图像处理

阎大鹏 苗鹏程 王海林 贺安之
(华东工学院应用物理系, 南京 210014)

提 要

本文介绍了利用脉冲 YAG 激光引爆起爆药产生爆轰流场或燃烧温度场, 用时间序列干涉法首次获得了爆轰流场和起始燃烧过程的时间序列干涉图的实验结果。在此基础上, 采用条纹曲线检测法和双三次多结点插值样条函数从干涉图上提取爆轰场冲击波的波阵面, 并通过序列波阵面配准算法, 定量地计算了冲击波的传播速度。同时, 还定量计算了燃烧场温度随时间变化的分布。

关键词: 干涉度量学; 图像处理。

一、引 言

到目前为止, 主要是定性研究爆轰现象。由于爆轰流场的瞬时性、破坏性和危险性, 人们通常是使用高速摄影仪^[1]和高速阴影^[2]等方法进行观察和研究爆炸现象。利用非接触的光学干涉法来显示起爆药爆轰流场和燃烧流场的全过程, 定量研究爆轰冲击波的传播速度和燃烧流场温度随时间的变化分布有实际意义。

本文用一台小型的脉冲 YAG 激光来引爆起爆药, 用外调制的序列脉冲 He-Ne 激光光源、大口径长程 F-P 型干涉仪^[3]和直角棱镜扫描式高速摄影仪^[4], 获得了起爆药爆轰流场和起始燃烧过程的时间序列干涉图, 解决了起爆药爆轰流场的干涉法显示问题。文中还采用了一种新的条纹曲线检测算法, 通过计算机图像处理由序列曲线配准算法^[5]把时间序列冲击波波阵面配准在同一幅画面上, 根据波阵面的位移, 定量给出冲击波的传播速度。本文还由计算机图像处理技术, 从起爆药起始燃烧过程的时间序列干涉图, 定量计算了温度随时间变化的曲线。

二、实 验 装 置

实验装置如图 1 所示, 功率为 60 mW 的连续的 He-Ne 激光经声光调制器(衍射效率 70%)调制后, 产生脉宽为 $0.1 \mu\text{s} \sim 100 \mu\text{s}$, 间隔为 $1 \mu\text{s} \sim \text{ms}$ 量级连续可调, 脉冲个数可控的序列脉冲光源, 并经 L_1 扩束和 L_2 准直后形成一视场为 200 mm 的平行探测光, 进入间隔为 5 m 的分离式双镜 M_1 和 M_2 系统产生干涉; 由 L_3 成像透镜, 把干涉图和待测场成像在在直角棱镜式扫描高速摄影仪的胶卷(27 D 以上)上。

起爆药是 S-D 共晶药、导电药和酸性乙炔银, 置放在测试区域 M_1 与 M_2 之间。用一台

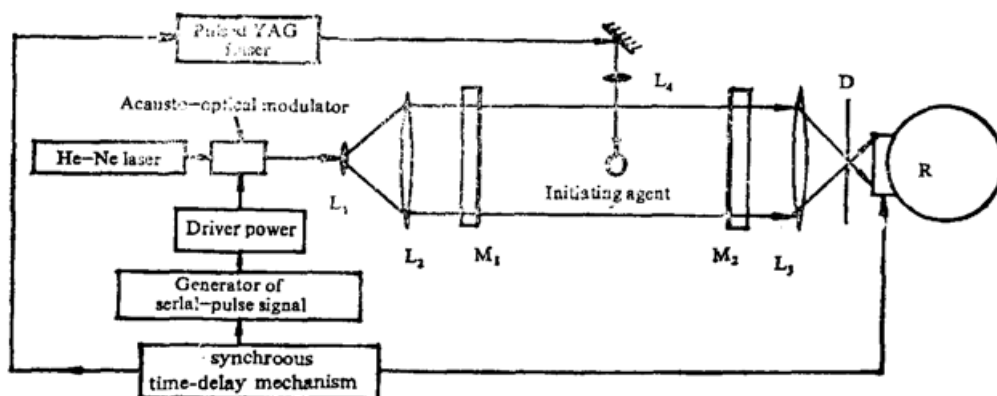


Fig. 1 Schematic diagram of experiment arrangement

小型的脉冲 YAG 激光器经 L_4 聚焦引爆起爆药, 最大输出能量为 50 mJ, 波长为 $1.06 \mu\text{m}$, 在染料调 Q 下, 脉宽为 20 ns, 在自由振荡下, 脉宽为 $200 \mu\text{s}$ 。单脉冲 YAG 激光、序列脉冲 He-Ne 激光的输出与直角棱镜扫描式高速摄影仪快门的启和闭都由同步延时器控制。

由 M_1 和 M_2 平面镜组成的分离式长程 F-P 干涉仪^[3], 当双镜的夹角 θ 很小时, 相位差取决于

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_0 d_0 \quad (1)$$

选择双镜内表面的反射率为 60%, 形成以双光束干涉为主的干涉条纹, 条纹的间距是

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

扰动场存在时引起条纹的位移量 $\epsilon(y)$ 与被测场的折射率 $n(x, y, z)$ 之间的关系是

$$\epsilon(y) = \frac{2}{\lambda} \int_{-z_0}^{z_0} [n(x, y, z) - n_0] dz_0 \quad (3)$$

式中, λ 是波长, n_0 是环境折射率。

三、实验结果与分析

1. 实验结果

作者用图 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起始燃烧过程。在调 Q YAG 激光脉冲引爆下, 用脉宽 $0.1 \mu\text{s}$, 间隔 $1 \mu\text{s}$ 的序列脉冲 He-Ne 激光探测, 获得起爆药爆轰流场的时间序列干涉图如图 2 所示。在自由振荡 YAG 激光脉冲引燃下, 用脉宽 $1 \mu\text{s}$, 间隔 $10 \mu\text{s}$ 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图如图 3 所示。

2. 爆轰场冲击波传播速度的定量计算

本文采用如下三个步骤从爆轰流场的时间序列干涉图定量计算冲击波的传播速度: 一是用计算机图像处理技术细化爆轰场的干涉条纹; 二是从细化后的干涉图中提取冲击波波阵面; 三是把时间序列冲击波波阵面配准在一张画幅上。然后根据冲击波波阵面的位移定量计算冲击波的速度。作者在 POVISION 图像处理机上设计了应用软件, 并对起爆药爆轰流场的时间序列干涉图进行细化, 图 4 为细化后爆轰流场的时间序列干涉图之一。

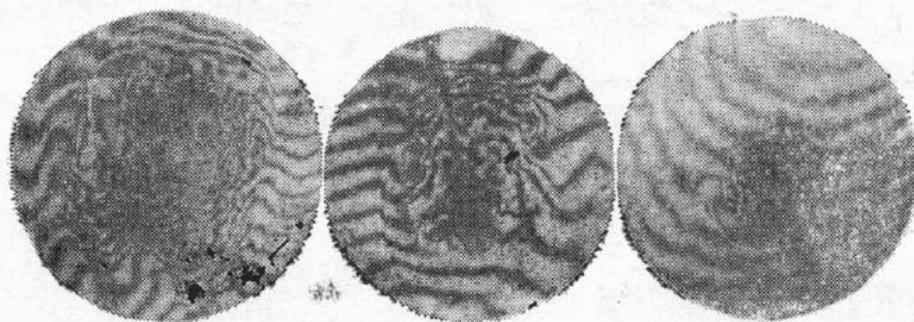


Fig. 2 Time-serial interferograms of explosive flow field of initiating agent

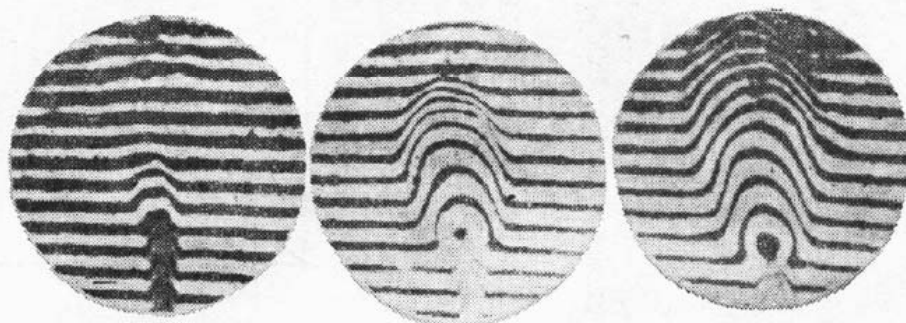


Fig. 3 Time-serial interferograms of initial combustion process of initiating agent

从条纹细化后的爆轰流场干涉图,把冲击波引起干涉条纹的突变点拟合起来,就可重建冲击波波阵面。在拟合条纹突变点构成冲击波波阵面中,对给定的 h ($h > 0$), 可选择适当的坐标系以及足够大的 N 和 M , 使图像函数的支撑区包含在矩形: $h < x < Mh$, $h < y < Nh$ 中。

利用双三次多结点插值样条函数把爆轰场中冲击波引起干涉条纹的突变点拟合起来,重建了冲击波波阵面,并把时间序列波阵面从干涉图中提出,图 5 为提取的冲击波波阵面。

为了精确地计算爆轰冲击波的传播速度,本文应用计算机自动校正,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。假定从时间序列干涉图得到的波阵面由于成像的放大过程等产生了二维平移和旋转,则由

$$\begin{cases} x = x_1 \cos \alpha + y_1 \sin \alpha + \Delta y, \\ y = y_1 \cos \alpha - x_1 \sin \alpha + \Delta y. \end{cases} \quad (4)$$

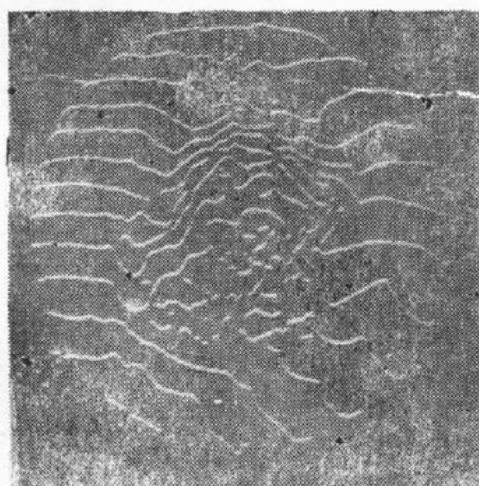


Fig. 4 The interferogram of explosive flow field after computer fringes thinning

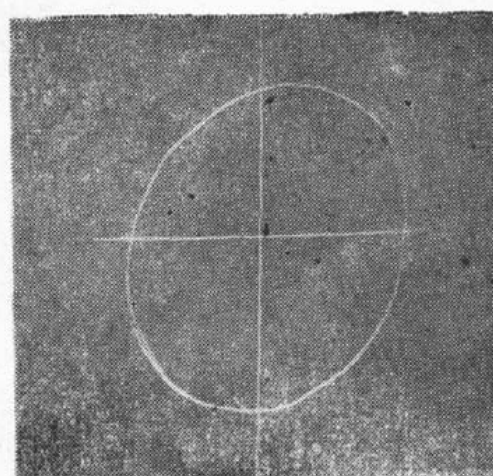


Fig. 5 Shock wave-front extracted from Fig. 4

式中 Δx , Δy 为平移参数, α 为旋转角度。对需配准的二幅图像, 在其静止的物体上找出两个或两上以上的对应点, 便可按上述方程组求出 Δx , Δy 和 α , 然后按(4)式对第二幅图像的波阵面曲线逐点校对, 再将校正过的图像与第一幅图像叠加, 便得到配准结果。图 6 为利用这种方法得到配准后的时间序列冲击波波阵面。由图 6, 可得到波阵面上所有点的传播速度, 图 7 为沿 $\varphi=30^\circ$ 方向的径向传播速度分布。

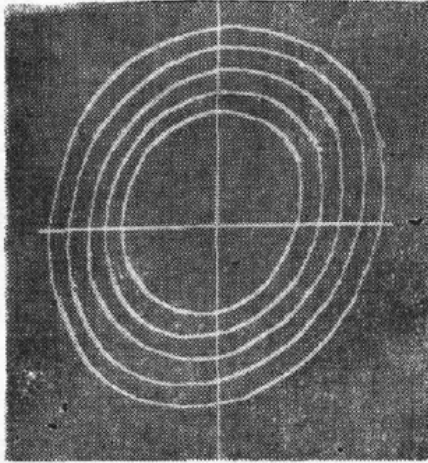


Fig. 6 Time-serial shock wave-front after registration

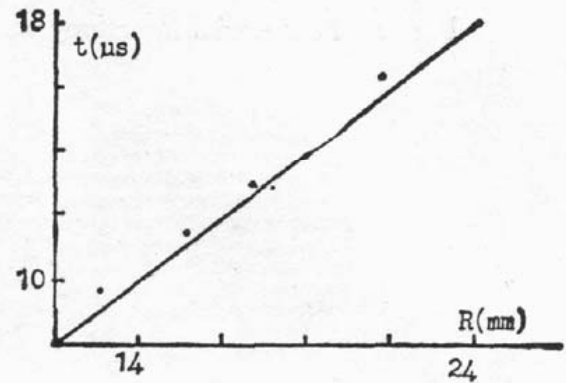


Fig. 7 Propagation velocity of shock wave along the direction of $\varphi=30^\circ$

3. 起爆药燃烧过程的温度分布

根据上述的干涉条纹细化算法, 把图 2 的起爆药起始燃烧的时间序列干涉图经过细化条纹处理后, 然后由公式

$$\epsilon(P) = \frac{|R(P) - N \cdot d|}{d} \quad (5)$$

在 PCVISION 图像处理机上编译软件, 实现了条纹位移量 $\epsilon(P)$ 的自动判读。(5)式中 $R(P)$ 是细化后条纹上任一点 P 与其对应参考条纹的垂直距离, N 是条纹级数, d 是条纹间距。

由于起爆药的燃烧场可看作是轴对称的, 则(3)式经过 Abel^[7] 反演后有

$$\Delta n(r) = -\frac{\lambda}{2\pi} \int_r^{r_0} \frac{d\epsilon(y)/dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy, \quad (6)$$

并假定理想气体状态方程适用于起爆药燃烧场, 则有^[8]

$$T(r) = \frac{[n_0(r) - 1] \cdot T_0(r)}{\Delta n(r) + [n_0(r) - 1]} \quad (7)$$

其中 $n_0(r)$ 为环境温度。(7)式可用来定量计算起爆药燃烧场不同时刻的温度分布, 以及温度随时间变化的分布。图 8 为初始燃烧过程中 $x=0$, $y=0$, $z=1.5\text{cm}$ 点的温度随时间变化的分布曲线。

4. 结论

(1) 本文介绍的时间序列干涉法能够用于起爆药爆轰流场和燃烧流场的全过程时间序列干涉显示, 所取得的结果在目前尚未见有资料报道。

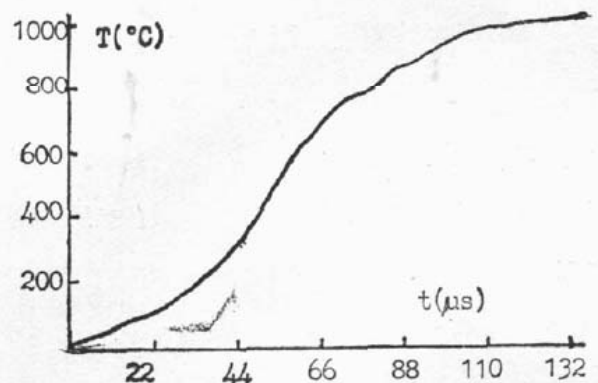


Fig. 8 Distribution of temperature with the change of time in the process of initiating agent combustion at point of $x=0$, $y=0$, and $z=1.5\text{cm}$

(2) 采用条纹曲线检测法, 双三次多结点插值样条函数拟合, 及序列波阵面配准算法, 可通过计算机图像处理技术, 从干涉图获取冲击波、定量计算冲击波速度。

(3) 大口径长程 F-P 型干涉仪在定量测试中的误差来源有, 计算公式带来的误差, 测试条件产生的误差, 条纹判读误差, 分析误差和折射误差, 而折射误差是主要误差来源, 对于轴对称场的测量, 可通过成像透镜 L_0 来消除由于光线的折射所产生的误差^[9]。

(4) 本文所得到的起爆药瞬态燃烧场的温度分布结果, 由于目前尚无可以比较的数据, 本文利用此方法测量了酒精灯的温度, 并与热电偶的测量值比较, 精度为 6%。

(5) 起爆药的冲击波结构不是球状的, 这是因为起爆药的形状不是球形的。

本文的实验工作得到了本校化工学院沈瑞琪博士的帮助, 在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 藤原修三, 角馆洋三等; 《工业火药》, 1984, 45, No. 2 (Apr), 98.
- [2] 中村裕一, 松尾日出男; 《工业火药》, 1984, 45, No. 2 (Apr), 106.
- [3] He Anzhi, Yan Dapeng *et al.*; *Opt. Engng*, 1988, 27, No. 10 (Oct), 814.
- [4] He Anzhi, Yan Dapeng *et al.*; *Proc. SPIE*, 1990, Vol. 1358, 26.
- [5] 刘 克, 杨静宇; 《兵工学报》, 1990, No. 3 (Aug), 81.
- [6] 齐东旭; 《计算数学》, 1982, 4, No. 3 (Aug), 244.
- [7] R. Goulard; 《Combustion Measurements》, (Academic Press, New York, 1976), 226.
- [8] 贺安之, 阎大鹏; 《光学学报》, 1986, 6, No. 3 (Mar), 284.
- [9] 阎大鹏, 贺安元; 《华东工学院学报》, 1988, Sum No. 46, No. 2 (Mar), 31.

Interferometric visualization and image processing of explosive flow field and combustion field of initiating agent

YAN DAPENG, MIAO PENGCHENG, WANG HAILIN AND HE ANZHI

(Department of Applied Physics, East China Institute of Technology, Nanjing 210014)

(Received 5 April 1991; revised 8 July 1991)

Abstract

In the paper, the experiment results of time-serial interferograms of explosive flow field and initial combustion process are presented which are produced by using pulsed YAG laser to detonate initiating agent and obtained with timeserial interferometry. On this basis, a method of fringes curve detecting and the function of double cubic many-knot interpolating splines are used to extract the wave-front of shock wave. With the algorithm of serial wave-front registering the propagation velocity of shock wave is calculated quantitatively. At the same time, the distribution of temperature with the change of time in the process of initiating agent combustion is calculated quantitatively also.

Key words: interferometry, image processing.