



讲 座

爆轰测试方法基础 (二) 高速光测技术

吴世法

(1984年7月15日收到)

一、引 言

人们认识和研究客观世界主要靠人的眼睛。人眼靠视神经和大脑中枢联系能够实时处理眼见的图象。但眼睛对快速过程的观察能力受“视觉暂留”的局限,时间分辨能力大约只有 10^{-1} 秒。原为每秒16~24幅的电影(或动画片),人们不会看出图象是在断续变化的。因此人们不能直接通过眼睛的观察,去研究时间分辨小于 10^{-1} 秒的快速过程。人类对客观世界中许多快速过程的认识例如爆轰、爆炸与冲击等,长期受眼睛时间分辨能力的限制,使得有关快速过程学科的研究难于深入。高速摄影的出现和发展打破了这个局限,实现了人类认识能力历史上的一个飞跃。使许多研究快速过程的学科,出现了飞跃式的发展。

高速摄影经过近一百年的发展,时间分辨已经突破毫秒(ms),微秒(μs),毫微秒(ns)和微微秒(ps)见表一,近20~30年来发展得最快。从1950年起,每二或三年召开一次国际高速摄影会议以交流学术动态。1984年在法国召开16届国际高速摄影和光子学会议。我国高速摄影学科发展起步晚,大致可以说是从1958年开始,但发展的速度是很快的,1961年2月在西安召开第一次高速摄影经验交流会时(14个单位31名代表参加),就已经试制出我国第一批高速相机样机(西北光学仪器厂、哈工大和浙大分别试制出三种样机)。1960年我国开始把高速摄影应用于研究工作,拍摄到时间分辨为 10^{-8} 秒的炸药爆炸过程的高速摄影图象。1962年我国成立了专门研究高速摄影仪器的西安光机所。于1974、1979和1982年先后召开了三次全国高速摄影会议。现在已研制和生产了10多种型号的高速相机,并具备研究和试制各种型式的高速相机的能力。所以可以说我国正在接近和赶上世界先进水平。国内各个领域中的应用高速摄影进行研究工作也都先后有所开展。

“Photonics”即“光子学”科学术语的提出,说明与高速摄影相关的一门新学科正在不断发展。1970年8月第九届国际高速摄影会议上L. J. Poldervaart首次创撰“Photonics”术语,自1976年第十二届国际高速摄影会议起,已易名为国际高速摄影和光子学会议。我国高速摄影会议自第二届起(1979年)也改名为高速摄影和光子学会议。由于“光子学”正处在发展中,对这名词的概念、内涵还在议论中,高速摄影界多数人认为光子学是研究作为信息载子的光子的规律性学问,我认为这种观点是可取的。它是高速光学测试技术,光通信等专业的理论基础学科。

要给高速摄影下个确切定义是比较难的,一般可定义为:具有一定空间分辨和同时具有人眼难于响应的快速过程的高速图象光信息,以摄影手段进行记录的过程,经典的记录介质是底片,光是可见光。随着新技术的发展,高速摄影的光子能量,从可见光扩大到X光,紫外光,红外光,彩色高速摄影和光谱分辨的高速摄影也发展起来了。高速摄影的记录手段也在发展,光电图象记录系统抛弃了传统的摄影记录介质—底片,不用黑密度记录信息而直接用与光强成线性的电量或数字记录

图象信息。这些新技术的发展,表明高速摄影的进展历史将自己的经典定义突破了。我们不能让学术名词来束缚学术发展,要重新来考察高速摄影这门技术学科的任务。它的任务是,在一切高速过程中,以光子作为信息载子的具有一定时间分辨和一定空间分辨的信息获取。没有空间分辨只有光谱分辨的高速光谱摄影,高速光电光谱记录技术,有空间(位移、速度)和时间分辨的光电记录的激光测速技术等等不少高速光测技术,都难于纳入高速摄影学术名词以内。新发展起来的以纤维光学应用于高速光测技术中的光纤传感技术光信息(包括图象光信息)的传输、记录等技术,就更难于纳入高速摄影的经典的学术名词以内了。我们提出一个学科分支名词,叫“高速光学技术”。它是以研究、发展高速光学测试技术为自己的学科任务的,它是近代光学的一个分支。它不尽包括高速摄影而且包括光信息的处理技术,它包括各种高速光学测试技术全部内容。它的任务是从事一切快速过程中,具有超过人眼时间分辨的以光子作为主要信息载子的信息的变换、传输、记录和处理全过程的研究。“高速光学技术”这门新兴技术学科分支的特点有两方面:(1)以光子作为主要信息载子;(2)有高的时间分辨。

“光子学”的名词被高速摄影界提出来,仿照“电子学”有“通信电子学”、“测量电子学”,“光子学”也有“光通讯光子学”,“高速光测光子学”等;有“电子仪器”也有“光子仪器”;有“电子工业”也有“光子工业”。“光子工业”在当代新的工业革命中已列为重要发展内容之一。光信息技术在信息社会中有很大发展潜力,光子将成为信息社会中重要的信息载子之一。光子学与集成光学技术发展,计算机技术发展相结合,将成为很有发展前途的新兴学科之一。

二、高速光学测试中的五个基本组成过程:



1. 光信息变换。某种快速过程中的物理量,需要用高速光测技术进行量测时,首先要作信息变换。将客观的物理量信息,变换为用光学测试技术可以测量的光信息,即使光子成为信息载子过程。没有这一过程的任何测试技术,都不能称为光测技术,但是高速光学测试的过程,并不要求信息载子自始至终都是光子,它可以根据信息传输、时间分解、信息记录和信息处理等这些后继过程中的需要,将光子信息转换为其他信息载子以完成整个测试过程。这些后续信息转换过程内含在这些基本过程之中,不单独作为基本过程列出。

光信息变换机制可以利用光的许多信息调制特性,如光强变化,发光空间位置,光的反射、散射、折射、干涉、偏振、振幅、相位、波长和频移等等。例如:

(1)一些快速自发光过程,电爆炸、电火花、燃烧、爆轰、爆炸、脉冲等离子体等其空间时间动态诊断,可方便地利用发光空间位置和光强随时间变化的信息:

(2)发光的光谱特性可利用来测温(亮温,色温)如果是黑体辐射,Plank辐射公式就是黑体温度和光信息之间的变换函数。

(3)非自发光过程,可以设计照明来做光信息的变换机制,反射、透射都可以利用。

(4)阴影—纹影显示全息干涉条纹和莫尔条纹显示都是很好光信息变换技术。

(5)X光可以对非透明物体进行造影,透过爆轰产物进行摄影。

(6)各种光纤传感技术等。

2. 信息传输。主要的光信息传输手段,特别是图象光信息传输是靠光学系统(成像透镜组)。它是空间相关的平行的多信道传输系统,由具有一定对比度的空间分辨率和象面大小决定信道数,平

行传输信道量之大, 其它传输信道难于比拟。各种“光导”是单信道传输系统。光纤是长距离的光信息传输系统。现在正在发展跨海洋的海底光缆。光缆在高速光学测试技术中, 是正在发展的很有用的一种光信息传输通道, 它比同轴电缆电信息通道有许多特点, 即通频带高、抗电磁场干扰、重量轻、体积小、价格便宜。特别是时间响应要求很高的信息传输通道, 例如每公里大于500兆通带信道, 只有光缆才能达到。

3. 时间分解。这是高速光测技术中最关键的组成过程, 这过程的任务是将信息变成可以进行时间分辨记录的信息。如果应用底片作为光信息记录介质, 一切能让底片和底片上光信息作相对运动的机构, 都可用作时间分解过程。对一维空间图象光信息(或点的光信息), 它们的相对运动需要连续。对二维空间图象光信息, 它们的相对运动需间断, 曝光时间内需相对静止, 以保证空间分辨率; 时间分解过程中需相对运动, 保证有时间分辨。底片运动方式有: 针定位间歇式、连续卷片式和转鼓式。连续动片中, 用棱镜补偿底片上的象移形成间歇式的相对静止, 以此作为曝光时间。转镜光束扫描的时间分解过程是动象方式(底片静止), 这种时间分解过程的时间分辨本领比动片方式高, 它不受底片抗拉强度和大型转鼓机械强度局限。较小型的转镜, 不需要很大功率可以达到很高转速。它是光学系统中平面反光镜部件。因为转动离心力作用, 反光镜面的形变影响光学系统成像的质量, 使得转镜系统的时间分辨本领也有它的最高极限。狭缝扫描式相机极限时间分辨约 1 ns 。应用 Miller 原理(分幅光栏扫描) 转镜分幅相机极限幅频约 10^7 幅/秒。再高时间分辨的时间分解过程, 一般采用光电子扫描技术, 即变象管。它首先将光子信息利用光电阴极变成光电子信息, 光电子象用电子透镜技术将它成像在记录荧光屏上, 斜坡扫描电场将光电子束作快速扫描, 以达到高时间分辨(最高已达亚微量级时间分辨)。分幅变象管的扫描电场需要应用阶梯扫描电场。二个正弦反相异步偏转波形组合, 被巧妙组成快速阶梯扫描电场, 达到了最高幅频为 6×10^8 幅/秒。网格变象管分幅已达 10^{11} 幅/秒。

时间分解中光信息的时间分辨本领大致就是记录的光信息的曝光时间。狭缝扫描高速摄影时间分辨本领等于狭缝象宽被扫速除的商。分幅高速摄影时间分辨本领不等于幅频的倒数, 而是每幅象的曝光时间。如果光信息传输过程中的响应已大到与曝光时间相比不可忽略, 则整个测试系统的时间响应函数, 等于曝光时间函数与传输时间响应函数的卷积, 卷积底宽为系统的时间分辨本领。

单个光信道可以在光电变换后, 用示波器做时间分辨机构, 示波器的极限时间分辨为亚毫秒。

4. 信息记录。传统的光信息记录介质是底片, 底片记录以信息密度很高和稳定性相当好为其特点。它是非线性记录介质, 记录信息(黑密度)和光信息(曝光量)的对数在一定区间有近似线性关系。当前金色超高速底片(34 DIN)的记录灵敏度大约为

$$H_{1s} \approx 0.01 \text{ 尔格/厘米}^2$$

(即黑密度为 1.8 时的曝光量, 常规条件下冲洗)。普拉片的记录灵敏度(正片, 黑密度为 0.5)大约比上述高速底片高一个数量级, 但记录的宽容度比较小。各种底片都有自己的光谱响应曲线, 全色片在波长 $0.45 \sim 0.7 \mu$ 区间变化小一些, 红外还没有高灵敏度的记录介质。光电器件, 一般是线性的光信息记录手段, 光电阴极都将光子信息变换为光电子作信息载体。各种光阴级都有自己的光谱响应曲线。光电子系统中能应用非常有效的电子倍增技术, 可以获得 $10^4 \sim 10^6$ 倍增系数。各种底片增感技术都只能产生倍数的倍增。高超光测技术中系统的记录灵敏度是至关重要的, 高倍增系数的光电倍增管比高灵敏度底片能记录的极限光信息约好二个数量级。因此一些转镜高速相机记录不了的光信息, 利用光电倍增管可以记录下来。发展时间分辨在毫微秒至微微秒量级的转镜相机不现实的理由, 不仅仅受转镜材料强度所限, 还受系统记录灵敏度的限制。能够记录光信息的光度需要很高, 或者说现有的底片记录灵敏度也不够了, 就是说曝光量不够问题也以成为限制。发展变象管高速相

机,能胜任毫微秒~微微秒时间分辨的高速摄影,重要的理由之一,它能方便地应用电子倍增技术,解决了曝光量因极限分辨时间减小,而出现曝光不足问题。当人们探索去发展毫微微秒时间分辨光测技术时,不能忽略记录灵敏度和被测光信息亮度的问题,大功率脉冲激光在记录灵敏度上打开了局限,它是更高时间分辨光测技术发展方向之一。微通道板象增强器新技术的发展,给超高速摄影带来许多好处,它的电子增益可达到 $10^4 \sim 10^5$,将它直接放在变象管或超快速示波管内(荧光屏前),使变象管和快速示波管具有当前最先进性能。

快门式微通道板象增强器本身,即可组成分幅式高速相机,也可构成X光图象和可见、红外、紫外图象信息记录系统。

视频摄像系统本身即是低速档的高速相机,又可做高速和超高速档的高速相机的图象记录系统。光导摄像管和光电二极管阵列都已有商品,它们的图象信息不记录在底片上,而存储在储存管或磁带上,这种记录系统可将图象数字化,因此它可方便地将图象信息直接输入计算机。近十年来这种系统发展很快。

5. 数据处理。计算机技术已经具有高度发展和应用水平,它给高速光测技术开辟了一个新的发展方向,它不仅仅可以使我们的数据处理提高效率,而且可以提高取得的数据的质量,加快实验进程,可做试验结果的速报。对一些花费代价很大的单次性实验,提高最后结果质量和数据的准确度,意义更大,有的相当于可少做重复性实验,获得较高的测试精确度,有的通过复原处理获得的结果,是通过重复试验也可能难于获得的。对于大型爆轰实验光测结果、X光闪光灯照相爆轰实验结果,作数据处理,复原技术的重要性是不言而喻的。难于分辨的高速光谱摄影所获得谱线,若重复实验仍不能分辨,通过光谱复原处理可以分辨出来。这已不是量的收获,而是质的提高。当然现在计算机还不很普遍,机时还比较贵,要选那种值得大做的项目才做。微计算机将会很快普及,在一些只要做小规模数据处理工作的量比较大的实验中,可发展自动数据处理系统。

高速光测系统的响应函数和结果的复原技术:快速变化的客观物理量,经过高速光测系统测得结果,在多大程度上反映被测的物理量,取决于系统的脉冲响应函数(或称系统响应函数、点扩展函数或模糊函数)。例如,被测物理量为时间波形或图象或光谱线,经各自的测试系统,波形畸变了,图象模糊了,谱线不能分辨了,这都是因为测试系统存在响应函数(难于响应),变模糊的结果。原则上任何测试系统都存在响应函数,测试结果都会在不同程度上变模糊。只有系统响应函数相对于被测客观物理量可以看作脉冲函数(δ 函数)时,测试系统又是线性的,那么测试结果在测试系统误差范围内是真实的。

以 $f(t, s, \lambda)$ 表示客观被测物理量函数, $g(t, s, \lambda)$ 为测得结果, $R(t, s, \lambda)$ 为测试系统响应函数,则它们存在卷积关系

$$g(t, s, \lambda) = \iiint_{-\infty}^{\infty} f(t, s, \lambda) R(t, s, \lambda) dt ds d\lambda$$

当系统是线性的, $R(t, s, \lambda)$ 可被视为 δ 函数时,则

$$g(t, s, \lambda) = f(t, s, \lambda)$$

即测得结果就是被测物理量,结果是可靠的。

当 $R(t, s, \lambda)$ 不能被视为 δ 函数时,测到的结果就不能直接反映被测物理量,现实的测试系统常常是如此的。但如果我们能设法知道 $R(t, s, \lambda)$,则我们可以通过复原技术(如反卷积等数学方法),由测得结果 $g(t, s, \lambda)$ 复原出客观被测物理量 $f(t, s, \lambda)$ 。而 $R(t, s, \lambda)$ 可以通过实验或解析办法求得,复原过程需通过大量计算机运算进行,这是一门正在发展着的新技术。过去 $R(t, s, \lambda)$ 不能被视为 δ 函数的测试系统结果无法处理,现在有了先进计算机技术,数据处理技术已具有了发展条件。

三、高速光学测试特点

1. 光是物质的极限速度，光测能达到的时间分辨能力最高。人们可以利用物质世界的许多物质特性进行客观过程信息测量，如光、电、磁、声等等。光和所有电磁波，具有物质的极限速度，它们携带信息传递的速度最快，以速度论，它不会被快速物质过程本身变化所淹没。如果快速变化物质过程速度大于信息传出速度，实时信息就传不出来。因此，只有光（电磁波）信息测量，才有可能达到最高的时间分辨能力。

2. 光测有可能达到较高的空间测试精度，有较高的空间分辨率，这是光学仪器所具有的特点。光学仪器可以将被测对象（作线度的放大，相干光学长度计量，激光测速中位移变量和全息诊断中微量变形等），可以测到波长数量级，这是其他测量方法难以达到的。

3. 许多光测可以实现非接触式测量。一般非接触式光测可以干扰被测状态，有些物理量测量只允许应用非接触式测量技术。

4. 透明介质内部可以实现可见光透视诊断测量，非透明介质用X光同样可以进行透视诊断测量。

5. 许多快速过程本身伴随自发光过程，如燃烧、爆轰、放电、等离子体等等，自发光过程本身就携带着许多需要测量的物理量信息，因此发展高速光测技术有许多方便之处和优点。

6. 高速摄影光测技术，是平行的多信道的量测系统，其平行信道之多是任何其他量测技术无法比拟的。信息时代即将到来。发展大信道容量的高速光测技术、自动数据输入计算机和自动处理技术是时代的需要。

四、高速摄影与光子学技术在爆炸与冲击实验研究中的应用

1. 转镜扫描摄影技术在爆轰实验中测量爆速和波形。利用爆轰自发光信息，一维空间—时间连续扫描记录，可测出药柱侧视爆轰发展过程和药柱端面爆轰波（以时间表示）的波形。图一为爆轰波侧视的位移—时间扫描象，曲线斜率是速度信息。图二为用光探板和三狭缝扫描测波形的图象。



图1 测爆轰波速度时静止象和扫描象

图2 测爆轰波波形时静止象和扫描象

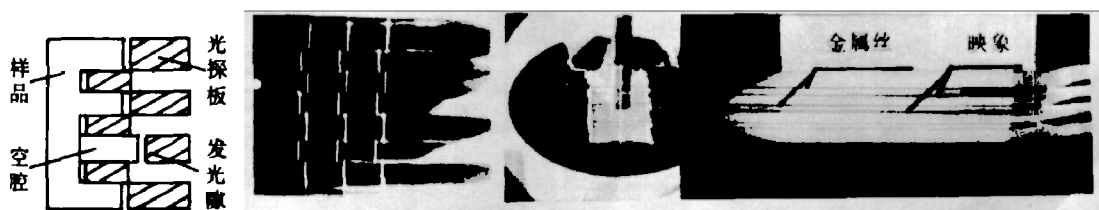


图3 测冲击波和自由面速度三缝扫描象

图4 金属线映象法测自由面速度的静止象和扫描象

2. 化爆高压下材料冲击压缩物态参数测量。在冲击波自发光不够的过程中, 需要应用光信息变换技术, 常用光探板和发光间隙技术以显示固体材料中冲击波和自由面运动的信息。图三为三缝扫描记录台阶样品的冲击波走时和自由面走时信息扫描象。

此外, 还有金属丝(或刀口)映象法棱镜反光截止法等多种冲击波速度和自由面速度光信息变换技术。金属丝映象法要用照明光源, 使金属丝和它在样品表面(需镜面)上的映象同时成象在扫描相机狭缝上, 样品自由面运动时, 映象相对于金属丝将以两倍于自由面的速度运动, 图四中映象扫描线的倾斜段即为自由面速度信号。

3. 轨迹法测轴对称飞片各点运动轨迹。在轴对称运动前提下, 可用一台扫描相机记录轴对称飞片上各点运动(二维)的轨迹。图五是飞片静止象和扫描象。飞片上标出各对称点如 A, A' (不反光黑标点), 飞片表面抛光, 设计特别照明光源, 飞片轴与相机轴交角 α (二轴与相机狭缝共面), 则 A 点运动轨迹为(坐标原点取 A 和 A' 起始点, 时间 $t = 0$)

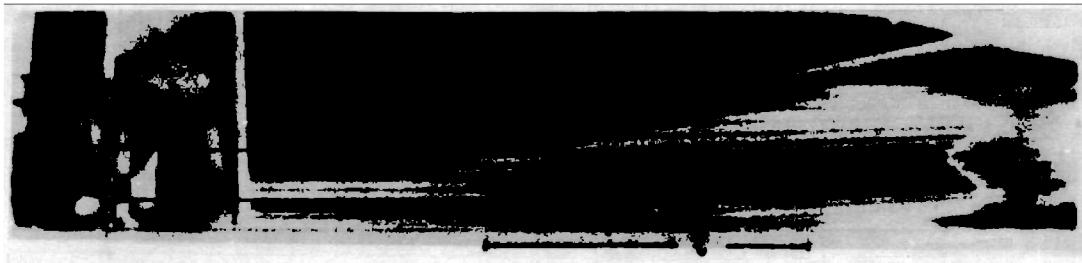


图 5 轨迹法测轴对称飞片各点运动轨迹扫描象

$$\begin{cases} \rho(t) = \beta A \left[1 + \left(\frac{A' + \Delta c \cos 2\alpha}{A \sin 2\theta} \right)^2 \right]^{1/2} \\ \theta(t) = \alpha - \sin^{-1} \left(\frac{A}{\rho} \right) \end{cases}$$

式中 $A(t)$ 和 $A'(t)$ 分别为 A 和 A' 位移 $\rho(t)$ 时在相机狭缝像上的投影值, θ 为 ρ 与飞片轴夹角, β 为光路中物和像的比高。

4. 点栅扫描和网格扫描分幅技术。将点栅分划板(即斜方阵列孔板)代替扫描相机中的狭缝, 可测量空间上离散点的时间信息。图六为一个平面爆轰波的点栅扫描照片。

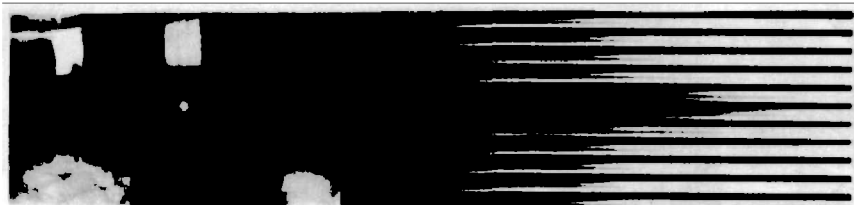


图 6 点栅的静止象和扫描象

相机原理与点栅扫描类同, 它需要一个快速开关快门(至少是关门), 将点栅扫描尾部信号截去,

从而允许安排更多的空间信号点,用小透镜做网格板,几十幅分幅图象以扫描顺序排列在一张底片上,每幅象的象素是离散的(空间)。观察它时需专门的设备,也可以用计算机图象显示系统来显示,它比常规分幅相机有更高幅频和时间分辨本领,但高幅频时快门难于解决。

5.分幅摄影和时间放大技术。二维空间—时间变化过程的诊断、测试需要应用分幅摄影技术,分幅摄影有单幅、数幅和以一定幅频多幅(有人称电影高速摄影)之分,图版I中有爆轰实验中三个冲击波在水中相碰,炸药透镜外金属罩破碎和飞片变形过程的分幅摄影照片。幅频均为 2.5×10^6 幅/秒。图七为穿甲过程的分幅摄影。

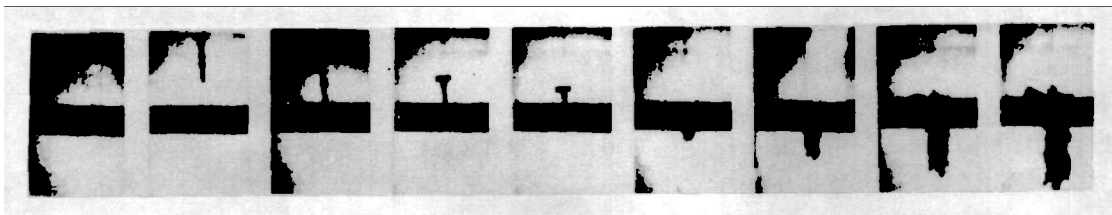


图7 穿甲过程分幅摄影(幅频6.25万幅/秒)

时间放大技术,将分幅底片改制成每秒24幅电影放映片,动态图象数秒过一幅,使眼睛和思维能跟得上观察和思考,以利教学和科普工作,100幅 2.5×10^6 幅/秒的炸药爆炸过程已被改制成能放5分钟的电影。

6.纹影—阴影测试技术。扫描或分幅相机前配置纹影—阴影装置,在气动力学和凝聚态动力学中都有重要应用。纹影可显示透明介质折射率变化,这种阴影轮廓特别清楚。图八、图九分别为雷管爆炸过程和钢板上产生射流过程的纹影—阴影分幅高速摄影照片。

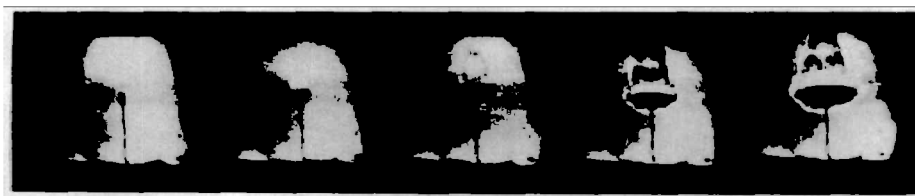
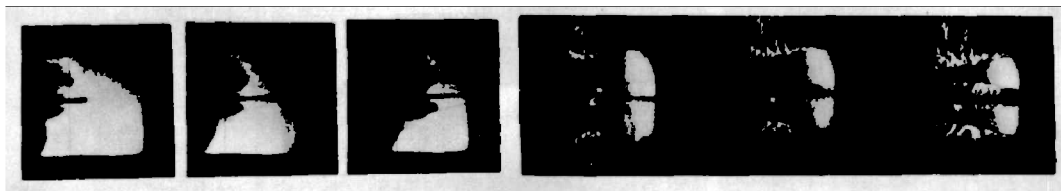


图8 雷管爆炸过程分幅纹影—阴影象(40万幅/秒)



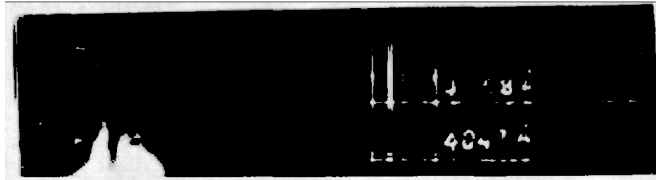
(a) 钢板上一个射流纹影—阴影摄影(40万幅/秒) (b) 钢板上三个射流纹影—阴影摄影(40万幅/秒)

图九

7.彩色高速摄影技术。彩色摄影有色调丰富、信息容量大的特点,但高速摄影对象一般均需高温高亮度才有足够曝光量,高温高亮度的色调就单调了。采用假彩色有很好效果,可以避免光学系

统色差和二级光谱象差使图象清晰。兰绿光判读灵敏度高,可提高测试精度,见图版I。纹影仪采用彩色刀口(以彩色层次对应一定纹影偏角)使纹影技术可作半定量测量,见图版I中彩色纹影照片,用假彩色纹影方法半定量测电爆丝球形击波强度。

8. 高速光谱扫描摄影技术。光谱装置与扫描相机结合可以记录快速过程光谱时间特性。可以研究快速过程中分子、原子过程和测量温度,图十为金爆炸丝爆炸时的连续谱和线谱时间扫描记录象。



爆炸丝 标定汞灯线
图10 金爆炸丝爆炸过程光谱扫描象(3 mm/μs)

9. 莫尔(Moire)高速摄影测量技术。该技术可以用它测量物体形貌变化和振动过程,可以测一平方米视场内亚毫米至10毫米量级的

变化,测试精度可达到±5%左右,不同的对象可设计不同的莫尔高速摄影系统,测不同的变形量级。图十一是阴影莫尔高速摄影测量铝板变形过程(25万幅/秒)。

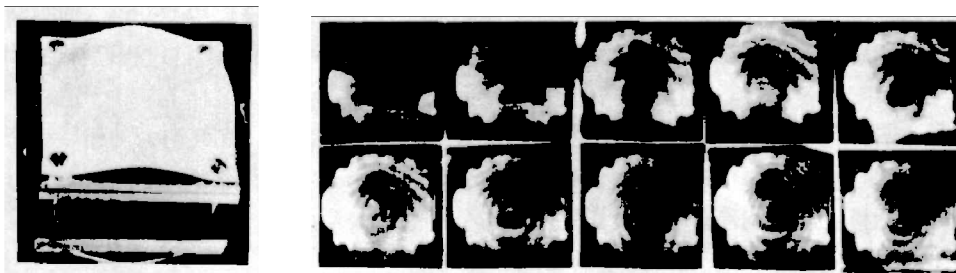


图11 电爆箔冲击铝板变形过程莫尔高速摄影

全息干涉高速摄影测量变形和振动过程的量程在亚微米至十微米量级,莫尔法和全息干涉法测变形绝对量时,条纹场中必须有零级条纹(即已知变形量为零的对应条纹)。否则只能测出相对变形值。

10. 脉冲全息干涉光测技术,可应用于微量(波长数量级)的变形和振动测试,也可用于等离子体诊断。如爆炸丝和束靶等离子体的电子密度诊断,冲击波诊断。因电子密度和折射率存在一定关系,利用折射率变化和二次曝光透射全息干涉图即可测出等离子体的电子密度(N_e)。图十二为0.06毫米直径铜爆炸丝爆后0.25微秒时刻的全息干涉图和 N_e-r (半径)曲线。

11. 光谱法测瞬变高温和瞬变光谱亮度技术。底片高速摄谱法测温误差大(约为±8%),光谱光电法测温误差小(约±3~5%),在可见光波段,它适合于测44~1万K高温。用光栅光谱仪光纤阵列做光导体、光电记录铜谱线相对强度法测金爆炸丝瞬变温度一个结果见图十三。

此外还可用多道干涉滤光片、单色滤波等方法测光谱亮度和测温,这方法测得炸药光源(TNT/RDX 40/60)峰值光谱亮度在400~700毫微米区与黑体温度 8216 ± 259 K一致。峰值积分辐射亮度为 3.2×10^7 (±10%)瓦/厘米²立体角。

12. 高速摄影诊断等离子体产生和发展过程。用每秒15千米扫速的铍镜扫描相机对1°角向收缩放电管进行诊断,结果见图十四,开始为予电离后主压缩形成的等离子体,0.3μs左右等离子体被

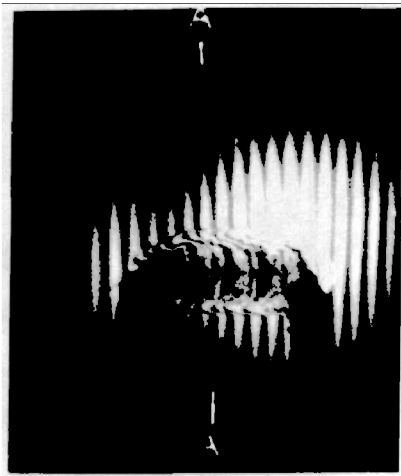
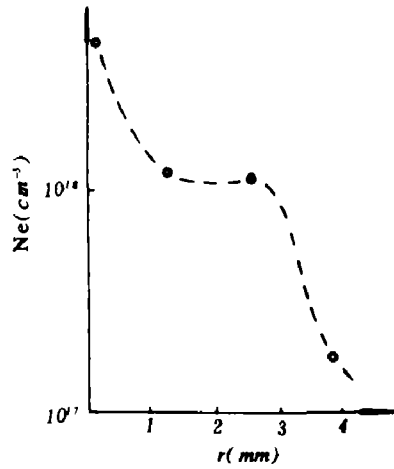


图12 爆炸丝全息干涉图



A-A剖面 Ne-r 粗算结果

压缩到放电管中心，等离子体呈壳层结构，磁流体振荡，1 微秒后向汇流板方向漂移，2 微秒后开始旋转，箍缩速度约25毫米/微秒。

13. 激光干涉测速技术。它有非常广泛用途，化爆、气炮、电炮、束靶和弹道等过程中，粒子速度和自由面运动都可以测量，而且测速精度很高，可达到 ±0.5~0%，利用 Doppler 原理发展了许多型式干涉测速仪，有位移干涉测速仪，差分混频干涉测速仪，法布里—珀罗干涉测速仪，任何反射面速度干涉仪 (VISAR) 等，VISAR 的功能最佳，量程可以从十几米~几千米/秒。图十五是用 VISAR 测出的电炮加速飞片运动速曲线

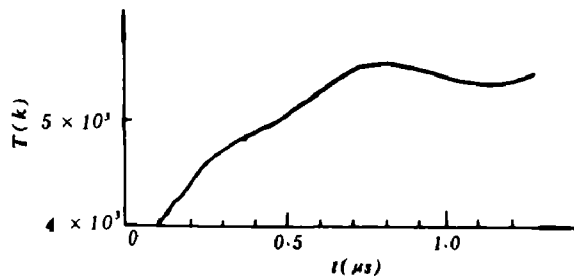


图13 直径0.05m金爆炸丝瞬变温度

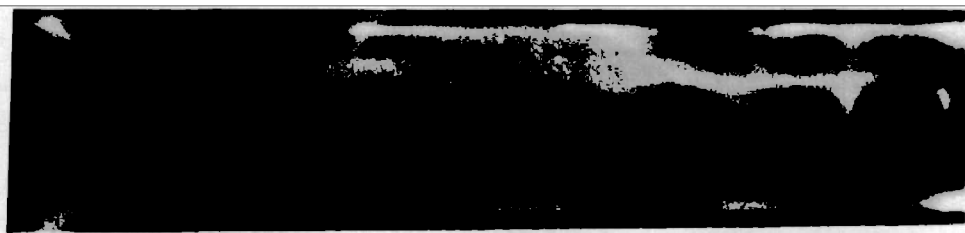


图14 1°角向收缩装置(充氦 1 × 10⁻¹ 托)等离子体主压缩第一半周期过程扫描象

14. 光纤传感技术。在爆炸与冲击中应用的光纤传感技术是正在发展的一种新技术，目前有：(1) 各种型式光探针：发光式，透光截止式，反光截止式等；(2) 光纤速度干涉仪；(3) 光纤快信号传输技术 (可以达到 1 千兆赫/公里以上通频带，模拟传输)；(4) 图象光纤传输技术等。

文中引用照片取自全国第三届高速摄影和光子学会议上有关报告，向有关作者表示谢意。

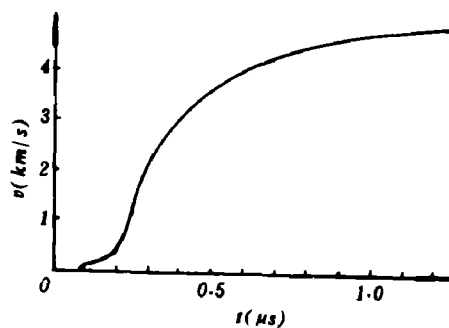


图15 VISAR测速结果

ELEMENTARY DIAGNOSTIC METHOD FOR DETONATION

(2) HIGH SPEED OPTICAL TECHNIQUE

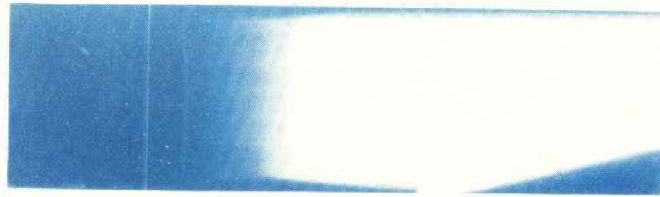
Wu Shifa

吴世法:

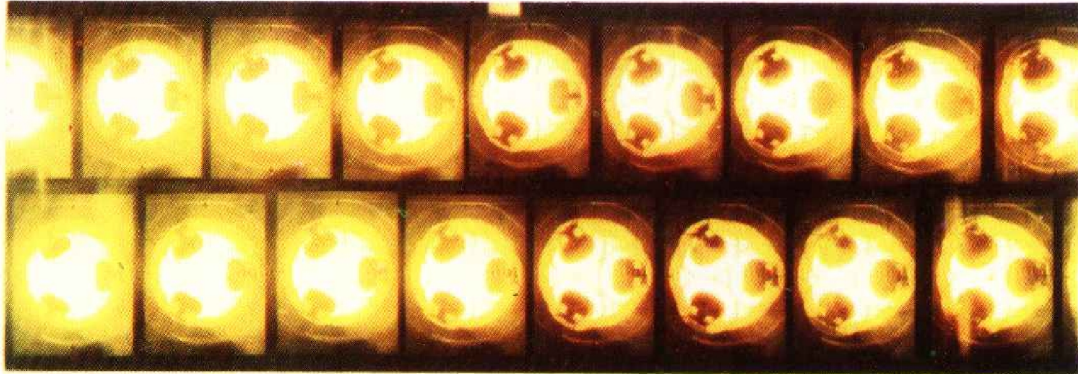
图版 I

爆轰测试方法基础

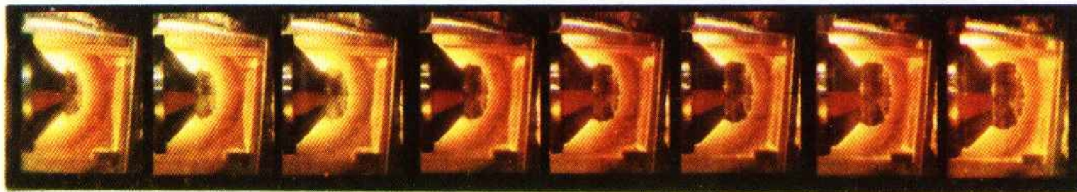
(二) 高速光测技术



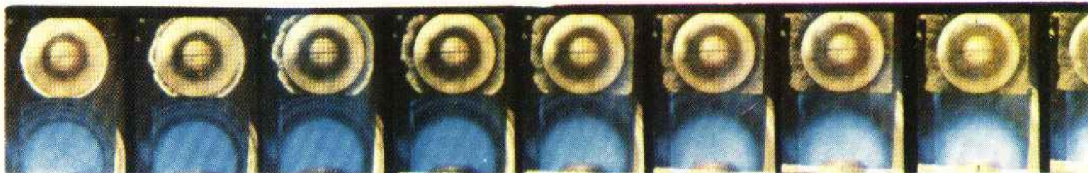
炸药平面爆轰波波形扫描象 ($3\text{ mm}/\mu\text{s}$)



水介质中三个药柱驱动的冲击波相互作用 (2.5×10^6 幅/秒)



炸药平面波透镜金属外壳破碎过程 (2.5×10^6 幅/秒)



炸药驱动平面钢飞片 90° 两视向动态过程 (2.5×10^6 幅/秒)



高速彩色刀口纹影法半定量测电爆驱动空气击波强度

(波头后绿 $M 3.47 \sim 2.83$, 波头后黄 $M 1.65 \sim 1.38$, 波头后兰 $M 1.17 \sim 1.03$)

假彩色高速摄影照片