

# 爆炸力学测试的国外情况

中国科学院力学研究所 赵双禄 张 挺 顾道良

## 一 爆炸力学的测试方法

爆炸力学在力学领域中是一门比较新的分支,它的发展对于国防尖端技术和国民经济建设有着重大的推动作用。

虽然早在上一世纪弹性动力学的数学理论就已经具有较完善的形式,但当时还找不到合适的测试方法来观察应力波在介质中的传播,因而未能得到广泛的应用。直到本世纪三十年代以后,一方面由于第二次世界大战的推动,另一方面电子技术也逐渐成熟,可以解决应力波的观测问题,于是便开始重视研究材料在强脉冲载荷作用下的动力性质,从而发展了固体中塑性波的理论及冲激波的理论。

由于爆炸力学具有重要的实用价值,迫使不少课题等不到理论上的完全成熟,就开始了实验研究。而理论研究的本身又需要引入一些必要的基本假定,随着实验研究的开展,逐一地验证这些假定的合理性。总之,实验研究与理论研究是互相推动的,尤其是在理论还未完全成熟时,实验研究更有其重要的作用。

目前,爆炸力学中很多基本问题在数学分析上是很困难的,因而往往要发展某些测试技术,通过直接测量获得基本参数和一些经验公式,来解决实践中的问题,例如,水下爆炸的Cole公式。

随着电子技术及其他物理测试技术的发展,尤其是引入激光技术及电子计算技术后,爆炸力学的测试方法更加完善。与此同时对测试方法中的力学研究工作也在引起人们普遍的重视。这些都将对爆炸力学的基础理论研究和应用研究起着巨大的推动作用。

爆炸力学中的各种现象都发生在数秒到数百万分之一秒时间内,一瞬即逝。为了在这么短的时间内记录各种现象,测量各种参数,就给测试带来很大困难。从传感器的结构、记录器的形式直到参数的校准等都与一般的静态测量不同,有其特殊要求。

目前爆炸力学中主要量测的参数是压力(应力)、应变、温度以及运动过程(包括时间间隔、速度和加速度)等。为了更形象的观察各种现象,已经广泛地使用高速摄影和脉冲X光高速摄影。

针对上述特点,要设计不同结构的、不同使用场合的传感器;要使用不同类型的测

量设备,目前应用最广的是高压电子示波器及快速电子计数器。为了测量精度更高,使用更方便,还须引进各种记忆示波器、快速磁带记录器和数字测量存贮设备。

从测量场地上看,既可在各种大型的核爆及工程爆破现场,也可在小型的靶场,地下坑道或室内爆炸洞中测试;从测量距离看,既可由数公尺,也可到数千公尺以上;从实验性质看,既可有长期准备的“一次”性实验,也可有可重复多次的实验。所以爆炸力学测试包括着极其广泛的内容和复杂的测试条件。

## 二 爆炸力学的主要参数的测量

### 1. 时间间隔及速度的测量

在爆炸力学的快速单次过程中,直接与速度相关的测量方法较少,大多数都是测定通过一段已知距离的时间间隔来求平均速度或测量距离与时间的关系 $s(t)$ ,再微分求得连续变化速度。因而对速度的测量就变成对时间间隔的测量。

各种武器,实验用枪及轻气炮等的弹速,最普遍的是采用探针法,技术比较定型。

对于各种爆轰及爆炸现象的测量,用探针法比较简单而且也比较成熟。但是近年来由于闪光X射线照相技术迅速发展,为更形象的研究炸药的爆炸和高速物体的碰撞现象提供了一种新的手段。

闪光X射线是高速电子打在金属靶上产生的短波长( $0.001\text{Å}\sim 10\text{Å}$ )的短续期的射线,它可以透视不透明物体。目前闪光X射线系统的电压已达3000KV,拍片率达2百万幅/秒,闪光时间达20ns。X射线照相是一种阴影照相,不需透镜,所以视场深度大,容易调整。目前的闪光照相技术有几种,一种是单幅的,即一次闪光一张照片;另一种是高速电影照相,即用一系列短曝光时间构成X射线运动照片。可以由一个X光管顺序闪光或多个单次闪光的X光管顺次闪光构成。亦可拍摄立体X射线照片。X射线也广泛用于爆炸过程的测量,不仅是因为它能穿过炸药和烟云,而更主要的是它比较容易克服发光体的扰动。对于高速碰撞的研究,X射线照相也越来越重要。例如,BBL实验室使用600KV的X射线系统研究空心装药的射流的形成过程。他们还采用150KV系统研究旋转与侵彻的关系。用脉冲电子束( $\beta$ 射线)照相时,可以分辨更细小的物体。可将X及 $\beta$ 射线同时使用,从已获得 的弹着靶照片上可看出靶、弹的变形,碎片及烟云等。有关X射线照相方面的文献可参阅[1]。

在各种爆炸加工中需要了解工件的运动过程,普遍的采用探针法。这种方法虽然精度较差,但简单适用。可是在材料的高速性能实验中,对靶样的自由表面运动速度就要进行精确的测量,虽然也可以用探针法,但对探针的结构必须有所考究。为了防止过早的予电离,须在针上加保护罩或绝缘模,如(2)中给出的“银盖针”,(3)中给出的“西格玛针”。为了缩短放电路径,减小上升时间,也出现了各种同轴结构的探针[4][5]。

在利用爆炸飞片装置做物体状态方程的实验中,对于自由表面运动速度及击波速度多数是采用闪光隙及各种反射技术的条纹照相机。图1中给出闪光隙的原理图[6][7]。

闪光隙法就是在靶样与有机玻璃（或玻璃）块的间隙中充入氩、氦等气体，当驱动板撞击靶时，产生的击波会使间隙中的温度升高而发光，用高速扫描相机拍摄其条纹图，用以检测击波或自由表面的到达。

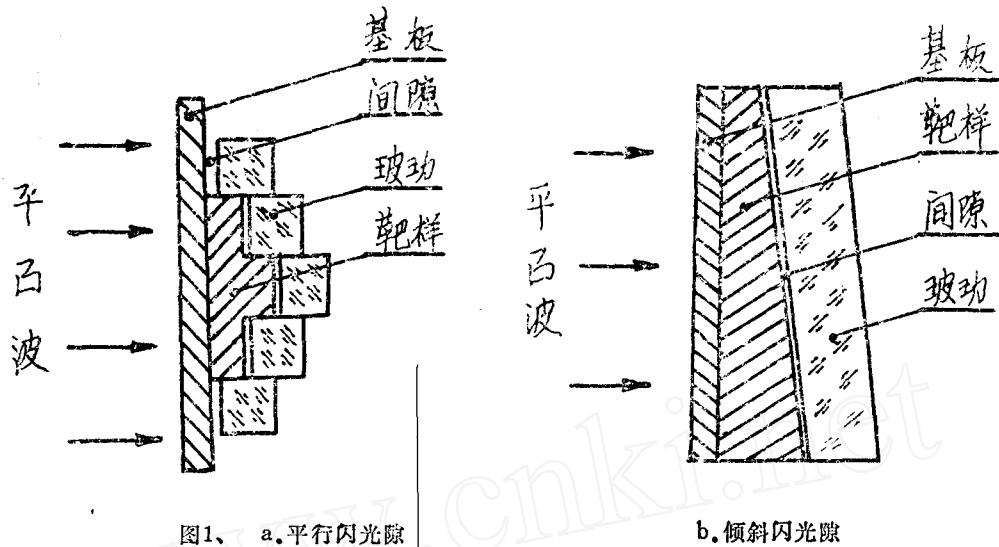


图1、 a. 平行闪光隙

b. 倾斜闪光隙

反射技术是使靶样的上表面为光学平面并平行地放置透明的玻璃块（如图2），当击波到达靶样的下表面时，使玻璃停止反射，到达上表面时使靶停止反射，在条纹底片上便记录下两个长度不同的光迹，便可推算出击波通过靶的平均速度。反射技术还有倾斜镜法、刀刃法和杠杆法等<sup>[8-10]</sup>。

靶样的自由表面运动速度的精确测量对做状态方程是很重要的。除了上述的探针法及条纹照相法外，还有倾斜电阻法<sup>[11]</sup>、电容法<sup>[12、13、14]</sup>及激光干涉法<sup>[11、15、16]</sup>等。L.M.Barker在1964年最先发表了倾斜电阻法，原理似乎很简单，但是安装要求非常高，使用很不方便。近年来有人把它用于测量复合板的复合过程，获得很好的结果。电容法在1961年即由D.S.Hughes及M.H.Rice分别发表，他们分别采用了直流，及交流电源。这是一种连续而且具有快速响应的测量方法。主要问题在于分布的杂散参数的影响及直流校准比较麻烦，但仍不失为一种较好的测量方法。激光干涉法测量位移也是在60年代就开始有了的，但用于快速测量首先还是由L.M.Barker等人

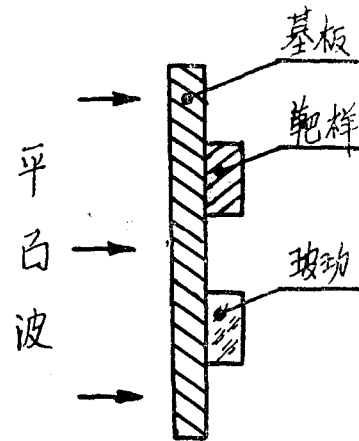


图2 平面镜反射法

他们在1965年开始的。他们报告，采用简单的迈克尔逊干涉仪，由于受到记录器上限频率的限制，只能量测数十米/秒的速度。他们又将简单的干涉法与多普勒原理结合起来，提出“延迟臂”干涉仪

(图3), 由靶样表面反射的激光经分束器1后, 一束经90°的全反棱镜的延迟后再与另一束相干。此干涉条纹被光电倍增管所记录。当靶样运动时, 会使反射光的频率及波长发生变化, 即  $\Delta\lambda(t) = -\frac{2\lambda}{C}u(t)$ , 其中 $u(t)$ 为靶样的自由表面运动速度;  $\lambda$ 为激光波长。若延迟臂长为 $L$ , 延迟时间为 $\tau$ , 波长个数为 $N$ , 则它们之间存在 $L = N\lambda = c\tau$ , 取导数后,  $\Delta N = -\frac{c\tau}{\lambda^2}\Delta\lambda$ , 故可得  $u(t) = \frac{\lambda}{2\tau}\Delta N(t)$ 。波数的变化 $\Delta N(t)$ 可用光电倍增管或光电变象管记录下来, 上述的干涉法的分辨率均很低。如果再要分析加速度的情况就更粗糙了。为此, P.M.Johnson等报道了一种“线性速度计”<sup>[17]</sup>, 即把被记录的干涉光线再经法布里—珀罗分光计分频, 而后再记录。上述这些方法均见于轻气炮的靶样自由表面运动速度的测量中。

激光反射法亦可用来测量自由表面运动, 1974年S.R.Dolce发表一种新型的位置灵敏检波器(PSD)<sup>[18]</sup>, 它是由半导体构成的光敏电阻器件。当靶样运动时, 反射光亦在PSD上运动, 即相当于一个可变的滑线电阻。这种测量方法是非常简单的, 但对PSD器件要求高了。

固体中击波速度是比较难测的。探针法虽可测量, 但须在靶样上打孔或车台阶, 安装精度也高, 否则测不准。上述的闪光隙及反射技术是可以测出击波速度的, 但仅在个别实验中适用。可是当击波到达时, 会使物态发生许多变化, 例如产生压电、压阻、发光、极化和热电等现象。利用上述原理, 可做出不同的击波检波器。但目前除压电晶体及锰铜丝外还不多见。就是这两种检波器, 往往也是用来测量峰值压力而不是做速度检波器。

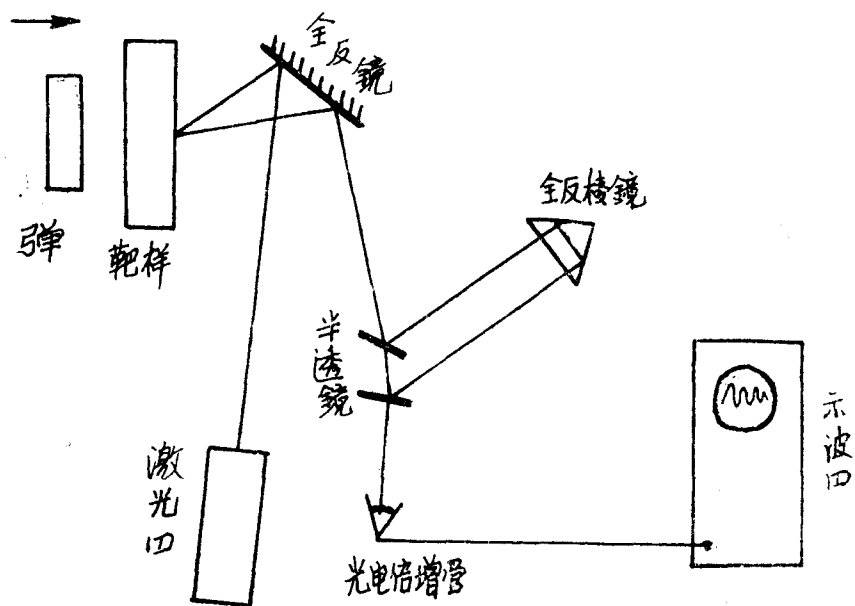


图3 “延迟臂”干涉仪

## 2. 压力及应力的测量

### (1) 空中爆炸压力的测量

空中压力传感器的类型较多,如压电式、应变式、电容式、变磁阻式及电感式等。对于爆炸力学测量,主要是要有快的响应,大的量测范围,强的抗干扰能力及较长的测试时间等。目前应用比较广泛的是压电式及应变式。应变式抗干扰能力强,适于爆源近区使用,但它的响应较差,自振频率一般为30~50KHZ。但是目前国外较好的产品已达100KHZ。随着半导体集成电路技术的发展,为膜片式应变压力传感器创造了超小型化的条件,自振频率可达1MHZ。压电式的响应特性好,输出电平高,但抗干扰能力差,因而在小型化爆、远区及实验室中用的较多。目前一些商品自振频率可达500KHZ,例如,Kistler公司的603A型。

在激波管实验中对压力传感器提出更高的要求。应用60年代发展的压杆技术<sup>[19]</sup><sup>[20]</sup>,可使上升时间小于1 $\mu$ s,甚至到100ns量级,压力从10<sup>-3</sup>巴到10<sup>3</sup>~10<sup>4</sup>巴,测量时间由数 $\mu$ s到数十ms,温度由常温到上千度。

除了晶体压杆外,还有电介质压杆<sup>(21)</sup>——Bagnoff压杆。可以把它看做一个变电容式压杆计。其上升时间约0.1 $\mu$ s,测量时间约为5 $\mu$ s。可以用它研究端面反射现象。A. B. Wenzel等研制了一种应变式压杆计<sup>(22)</sup>,采用一根高强度的一维应力杆,在杆的表面上贴应变片。用来测量空中和地下爆炸时接近爆心处的压力,其测量范围为700~20000 kg/cm<sup>2</sup>,上升时间小于1 $\mu$ s,可测量时间为400 $\mu$ s而且制造简单,价廉。

W. A. Holingren等用一个变阻抗传感器和一个长电缆载波调制系统<sup>[23]</sup>,能在高温、幅射及电磁扰动下工作,其上升时间约为2 $\mu$ s,可测最大压力达7000kg/cm<sup>2</sup>,可测量核爆时空中激波压力,亦可用于其他强爆炸条件下。

最近国外出现了所谓“Piezotron”的新一代传感器,是把压电式压力传感器及微型高阻抗放大器组合在一起,对于野外测量及抑制电缆效应是很有效的。

为了测量传感器的动态灵敏度及动态响应特性就要解决动态压力的标定问题。自60年代以来,国外研制了一系列动压标定设备。在100kg/cm<sup>2</sup>以下,激波管是个理想的标定设备,它可产生一个幅值已知,频谱丰富的阶跃压力波。在更大的压力时,就需要其他类型的标定设备,它可分为两大类:破膜式及快速阀门式。美国国家标准局(NBS)研制了一种液体介质的快启阀门装置<sup>[24]</sup><sup>[25]</sup>,加载速度为23,500psi/25 $\mu$ s,最大压力变化为50,000psi。

### (2) 水中压力的测量

水中冲击波可用小型的压电传感器来测量。由于水中介质均匀而且便于匹配,因而这种传感器很早就成熟了。上升前沿可小于1 $\mu$ s,峰压可达数千大气压以上,结构简单,便于在水中进行爆炸标定。

### (3) 固体中应力的测量

在研究脉冲载荷作用下的材料性质时,常常对激波结构及其衰减规律感兴趣,因而国外陆续研制了各种应力计用来测量材料中的应力历史。

R. A. Graham报道的一种石英应力计可测量低于50千巴的压力<sup>[26]</sup>。它由一块X轴

向切割的石英构成，表面电镀成保护环的结构，根据所给的灵敏度公式，在25千巴以下时误差小于 $\pm 2.5\%$ ，压力再大精度降低，因而多在25千巴以下。

R.A.Graham等将兰宝石作应力传感器。它的原理是基于击波压缩时使介电常数发生变化，同时电极间距离也在改变，这样就引起电容的变化。应力计产生的电流是材料表面质点运动速度的函数，在低应力时是线性的。60°方位的兰宝石能用至100千巴。由于兰宝石的波阻抗相当高，所以对重金属的阻抗匹配特性好，但是能用的晶体厚度决定，有效测量时间仅为0.25 $\mu$ s。

电磁法是利用一根埋在绝缘介质中的导线处于恒定的外磁场中，当导线随所在的介质在击波载荷作用下运动时，产生一个正比于速度的电动势<sup>[28]</sup>。基于此，它可测量绝缘试件的质点速度。C.Young等使导线的有效部分与击波波前成一角度，则所测的电动势与元件端部间的动量成正比，而电动势的时间导数则与元件两端间的应力差成正比。它不需要波传布的有关资料，而这些资料在将质点速度换算成应力时是必须的。因此电磁应力计对于有时间依赖关系的材料是有用的。

很多材料都具有“压阻效应”，但用于压力测量较多的是锰铜。这是因为它的制造工艺简单，性能稳定，温度系数小，静、动标定一致。它很早就用于静压测量了，只是到了60年代才开始用于动压测量。70年代工艺水平逐步提高，用腐蚀法或真空喷镀法加工出一种薄栅式元件，再用喷镀法制作绝缘膜，减小了应力计的侧向尺寸，同时增加了有效部分电阻。E.Barsis等将铜丝直接埋入绝缘材料中<sup>[29]</sup>。如试件为导体，则须增加一层薄的绝缘，以防过早短路。有效记录时间为数 $\mu$ s。

比较适用的其他压阻材料有钙、碳、锂、钢、锆和铌等。它们的灵敏度很高，如钙和锂在压力28千巴以内时压阻系数比锰铜约大10倍。但是温度系数很大，几乎与压阻系数相当。在高压时存在非线性而且化学活性强，因而它们目前仅在实验室内使用。

在60年代以前，对岩石中应力的测量，美国主要用应变测量技术来研究岩石中的应力波。这就需要掌握岩石取样的动力性质。通常都把岩石看为粘弹性体，而且还有滞回现象，所以其应力—应变关系比较复杂。但是从地下结构防护的观点来看，希望了解应力资料，因而直接测量岩石中的应力波就成为十多年来岩石动态测量的主攻方向。

在地下核爆近区及化爆药室附近，岩石可做流体模型处理。在此区段主要是采用峰值应力计，国外已报导过，在300千巴压力以下，用埋入式锰铜丝来测量激波压力<sup>[31]</sup>，但只能量测激波的波头；当滞后流出现时，使脆性材料破碎，测量也就无意义了。

在远区，岩石可粗略地看为弹性体。应力测量的问题常因阻抗匹配的问题而引起争论。60年代初，劳伦茨辐射实验室研制了一种以电气石为敏感元件的埋入式压力计，测量地下核爆时岩石中的应力历史。传感器的专门资料未见到。看来他们也是采用了对于埋件直接进行动标定的方法，而避开了埋入式传感器阻抗匹配这一理论上尚未完善的课题。直到70年代，某些实验仍在用这类传感器。它的量测范围可到数千巴（Z切电气石对平面激波的响应，在7千巴以下是线性的，在21千巴以下可用两个直线段来表示）<sup>[32]</sup>。

70年代斯坦福研究所发表的报告<sup>[33]</sup>，予期要研制一种埋入岩石和固体中的可在较长时间内记录的高灵敏度的压阻传感器。他们进行了两方面的工作：（1）研究了可能

做敏感元件的其他金属；（2）研究防止较早地应力破坏的埋设敏感元件的方法。所考虑的金属有钙、锂、钢、锶、铋、等。绝缘涂层材料用Lucalox（一种多晶的二氧化二铝）。在现场实验时仍考虑用薄胶泥来制预埋件，以减小埋点周围及预埋件内的应力畸变。目前还未见到他们的研究成果。

### 3. 超动态应变的测量

在爆炸力学领域内，动态应变的测量主要应用于：冲击载荷下结构的变形及材料在高应变率下的力学性质的测量。它的特点是：（1）要有快速的响应，一般要求上升时间小于 $1\mu\text{s}$ 。使用短基长的片子，快速响应的电路及记录器就可解决这个问题；（2）要有大的线性范围，应在 $10^{-2}$ 量级上，总之就是要有大的应变率，国内外对这个问题还是比较重视的。

前几年国外研制了一种“过屈服片”（Post-yielded gage），其线性段达4%，但对小粘结剂和引线都提出了一定的要求。对于丝式片，在大应变下主要问题是：（1）丝材在某些局部产生“颈缩”现象；（2）应力松弛；（3）胶不能准确地传递试件的变形。

基于丝式片的缺点，很多人推荐使用箔式片。它的性能要比丝式片好。W.N. Sharpe曾对高拉伸型箔式片进行了研究<sup>(34)</sup>。其结论是，箔式片测量塑性变形的能力可达8%。国内也有人对国产康铜材料的箔式片进行研究。它可承受 $20,000 \times 10^{-6}$ 仍保持线性，也可以在百分之几的塑性变形条件不破坏。他们发现片上的焊点在大应变时会脱开，影响实验。

有限的基长会限制记录波形的上升时间，目前国外已做到0.01吋，国内为（1—2）mm。

为了更精确的测量动态应变，国外发展了不少光学的测量方法。J.F. Bell早在50年代初就对绕射栅应变测量技术进行了系统的研究<sup>(35)</sup>。主要用于研究塑性波在一维杆中的传播规律，基本原理是用一单色光照射到刻于试件表面的光栅上，产生绕射现象。试件变形时，绕射角也发生变化，通过光电倍增管将其转换为电讯号，由电子示波器记录下来。它的优点很多：（1）片长短（0.001吋—0.005吋）；（2）可测应变范围大，约 $20 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-2}$ ；（3）不影响试件运动；（4）与试件无电接触；（5）上升时间快（可小于 $0.1\mu\text{s}$ ）；（6）可在高温下测量。但是刻栅工艺要求高，实验条件也很严格，因而，只能在实验室使用。1968年W.N. Sharpe报告了干涉式应变仪。<sup>(36)</sup>他在试件表面上刻了两个V型槽，将激光照到槽上，则产生干涉现象。试件变形时，干涉条纹也发生变化，记录下此变化即可换算出应变对时间的函数。虽然它的精度比绕射栅式差些，但工艺简单。曾用来测量8%的动态塑性变形。

如果对变形进行动态全息记录，再通过对全息图的干涉条纹的分析，就可获得应变场的变化过程。这是一种新型的测试技术，今后值得深入研究。最近莫尔条纹法也开始应用于较高速度的动态应变测量中。

在动态应变测量中，采用脉冲供电，可以简化线路并提高灵敏度。这虽然是60年代的技术，但对具体测量还是很有好处的。

高速高压下材料力学性质的研究包括两个方面的问题。一个是在高压下，可以把固

体材料当做可压缩的流体来处理。建立高压下固体的内能、比容、压力和温度间的函数关系,即做状态方程。为此就要测量冲击波速度和质点运动速度。也可以测量靶样的应力历史或瞬态温度的变化。主要实验设备是爆炸飞片装置及轻气炮。碰撞速度可由数百m/s到数万m/s。对于各种速度参数测量是比较方便而准确的,因而测压或测温方法用的比较少。但近年来测压方法也逐渐多起来。另一个问题是在压力较低时,就不能把材料看为流体,而需研究固体的弹塑性理论,此时固体中冲击波出现了复杂的结构。为了考虑应变率的影响,还需开展低静水压、高速动态应力应变关系等的研究工作。比较通用的是霍布金森杆的方法。目前测量方法已从常温到高温,压缩到拉伸,一般压力到高静水压范围。测试内容包括碰撞速度、动态应变或应力,尤其是动态应变测的较多。国外有的速度已达300m/s,应变率已达 $10^{-5}$ /s,压缩变形已达70—80%。

#### 4. 瞬态温度的测量

瞬态温度的测量在爆炸力学中是经常遇到的,同时也是比较困难的,目前还找不到一种合适的快速响应的测温方法。比较常用的仍是热电偶,但它在安装、结构方面存在很大困难。辐射高温计只能测量裸露部分的温度。无论那种方法,精确的动态校准都是很难做到的,而且在测量中伴随发生的各种物理效应都会影响测量结果,又不太好修正。

瞬态测温的主要特点是要有快速的动态响应。例如在上述例子中,上升时间应在纳秒之内。为此传感器要小,测量环节要少。

E.P.Palmer等<sup>(38)</sup>用高速枪发射 $\phi 4.67\text{mm}$ 的弹,以 $0.5\sim 2.1\text{km/s}$ 的速度打击薄铜靶。在靶后表面直接接触镀银铜线的单极热电偶。测得的上升时间为 $2\mu\text{s}$ 。S.W.Yuan等<sup>(39)</sup>在轻气炮上测量了不同材料在击波载荷作用下的温度变化,也采用了单极式热电偶,其上升时间小于 $1\mu\text{s}$ 。

在爆炸力学实验中,往往同时产生高温、高压及高应变率。有时也伴随有电磁、辐射或充电效应产生,它们对测量结果都会有很大影响。如何修正这些影响,目前看来还很困难。

另一种可能具有快速响应的测温方法是基于红外辐射测量原理的辐射高温计。它可测高于 $2000^{\circ}\text{F}$ 以上的温度,是一种光学测量方法。据文献报导,采用硒化铝为探测器时,上升时间可达 $2\mu\text{s}$ <sup>(40)</sup>。国外已经把它用于测量各种常规武器的膛温,在其他爆炸力学实验中尚未见到。这种方法只能测量裸露面的温度,就给使用带来很大局限。

目前总的印象是,测温方法还不太成熟,有待继续研究。

### 三 爆炸力学实验中的主要测试仪器

#### 1. 高速摄影机

高速摄影能够提供变化过程的空间——时间信息。它可以给人们直观的图象并将时间信息放大几百至数千万倍以上。而且基本不受电场、磁场的扰动。高速摄影机除了单独摄影记录外,还可与阴影仪、纹影仪、干涉仪及光谱仪等配合使用。正因为如此,它



在科学研究中得到了极为广泛的应用，尤其是在高速现象的研究中，更是一种不可缺少的实验工具。

目前在爆炸力学研究中使用较为广泛的是下述两种类型的高速摄影机。一类是旋转反射镜式高速摄影机，另一类是光电变象管式超高速摄影机。

旋转反射镜式高速摄影机的特点是：画幅频率较高，成象质量较好，一次能够获得较多的画幅。如美国Beckman—Whitley公司的189型<sup>(41)</sup>，摄影频率达 $20.3 \times 10^6$ 幅/秒，画幅尺寸为 $7.9 \times 14$ mm，画幅总数为120张。Cordin公司的330型是一种等待型旋转反射镜式高速摄影机。既能分幅，也能扫描，还可以同时分幅及扫描记录。分幅频率为 $2 \times 10^6$ 幅/秒，扫描速度为 $10.6$ km/s，画幅总数为80，画幅尺寸为 $(17.8 \times 25)$ mm。上述摄影机的象质鉴别率都高于25线/mm。它们反映了该类相机的国际水平。

光电变相管高速摄影机能达到极高的扫描速度和摄影频率，而对照明要求不高。如英国的Imacon—600型分幅频率可达 $6 \times 10^8$ 幅/秒，扫描速度可达 $50,000$ km/s<sup>(41)</sup>。这是目前各类高速摄影机中最高速度。它能分幅摄影也能扫描记录；能主动式的触发现象，也能等待式让现象来触发相机。但是它也有不足之处，就是变相管寿命有限，画幅数较少，象质鉴别率低。尽管如此，在研究爆炸力学领域中的超短现象时还是十分有用的。

高速摄影的方法很多，大体上有扫描摄影、二维平面摄影及立体摄影等，还可以用于显微、望远，全息及特种射线等摄影。

## 2. 激光器

激光作为一种单色性好，方向性强，而且能量集中的新型光源，已经和正在对各个学科领域产生巨大的影响，对爆炸力学的测量也是如此。

目前激光器已有许多种，但在测量技术上应用最广泛的是以下几种：

种 类	主 振 波 长	输 出 动 率
氦氖气体激光器	6328Å 红色	连续输出 几分之一~数百毫瓦
红宝石固体激光器	6943Å 红色	经Q调后，脉冲幅度可达 $10^8$ 瓦，宽度约数十毫微秒
氩离子气体激光器	4880Å 兰色	连续输出可在数十瓦以上

激光测量是非接触测量，不会影响被测物的运动。激光光束很细，可测出非常小的局部的变化。

据目前掌握的资料看来，几乎所有的爆炸力学的参数都可以采用激光测量。它越来越成为一种重要的实验手段。

## 3. 时间量测仪器

目前比较通用的是快速电子计数器，直接分辨力可达 $(10 \sim 5)$  ns。如果要求分辨

力再高,就须在测试方法上加以改进。这样快的电子计数器在爆炸力学的大部份实验中是够用了,但是它只有一个通道。在多数实验中却要求记录多个时间间隔,因而就须要研究多通道的电子计数器。1974年田中一三等研制了六通道的 $0.1\mu\text{s}$ 分辨力的电子计数器<sup>(42)</sup>。在核物理实验中的多道时间——幅度变换器,稍加改进后就可用于多通道时间测量上,分辨力可达数 $10\text{ns}$ ,但精度稍差。

在苏联应用较多的是圆周扫描的电子示波器,分辨力可以很高,但容量有限制。

#### 4. 模拟讯号记录设备

各种参数都要转换为电的模拟讯号,而且又都是单次瞬变脉冲。常用记录设备是高压快速电子示波器配以示波器照相机。这种记录方式精度不高,使用不方便,而且通道数少。

使用具有存贮功能的记忆示波器记录单次脉冲,是非常方便的。但读数,仍须照相。

快速磁带记录器是一种多通道记录仪器,它的记录长度是很长的,但它的上限频率只能到达数兆赫,因而不能记录过短的脉冲。但在现场使用仍是很方便的。例如,日本安藤株式会社的SABRE III型数据记录器,磁带速度为 $120\text{ips}$ ,上限频率可达 $2\text{MHz}$ <sup>(41)</sup>。

目前在国外电子测量仪器发展的动向主要是:

(1) 数字化:例如美国HP公司新生产的数字示波器,它除了记录波形外,还可由数字显示周期、有效值或峰值等参数。这些特定参数的量测精度很高。这对某些测量是非常方便的。

(2) 接口母线的标准化,可以使不同厂家生产的仪器共同在一个实验中使用,共同与电子计算机配套,有统一的指令及控制。

近年来波形存贮装置在国外发展很快。它的种类很多,名目也未统一,例如,瞬时时间变换器,波形存贮装置等<sup>(43)</sup>。它的方块图如图4。

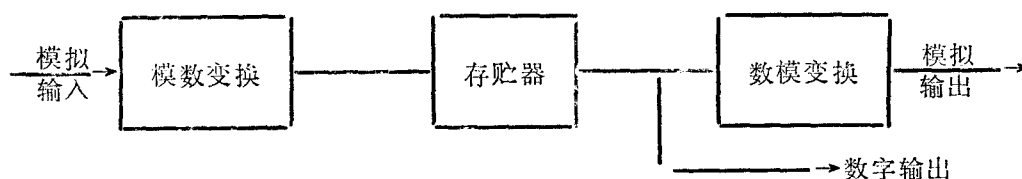


图4 波形记忆装置方块图

被测模拟量经快速模——数变换器变为数字量,由存贮器存贮起来,而后可按需要的周期由存贮器中连续地取出。这些数字码可以记入磁带、磁盘等记录器,或由数字打印机打出。也可以再经过数——模变换器,引出周期性的模拟讯号,由X—Y记录器、电磁示波器或电子示波器记录下来。数字输出也可以直接输入到电子计算机,或者把磁带、磁盘上的讯号回放到电子计算机中去,进行下一步处理,当模——数变换器为8位时,取样精度可达 $1/256$ 。位数再多精度更高。这是示波照片读数精度所不能比拟的。

#### 5. 电子计算机

目前看来大中型计算机除了计算外,似乎与实验联系的不多,而附加了用于科学实

验的外围设备及软件的小型计算机却可以方便地引入科学实验，使实验面貌一新。但是一般的小型电子计算机允许的数据取秒速度约为数十微秒，那么对于快速的爆炸力学实验就不够了。因而就须加入缓冲装置，而上述的波形存贮装置就是一种典型的缓冲装置。

最近数年来微型电子计算机在国内外发展得很快。它的速度偏低，存贮量不大，但可由几片大规模集成电路组成。甚至已有单片机产生。结构简单，使用方便，成本非常便宜。目前开始在各种科学测量中应用。对于爆炸力学测量，我们设想，它可以进行连锁控制，实验条件的修正，简单的数值运算等。下面以激波管测量为例（如图5）。

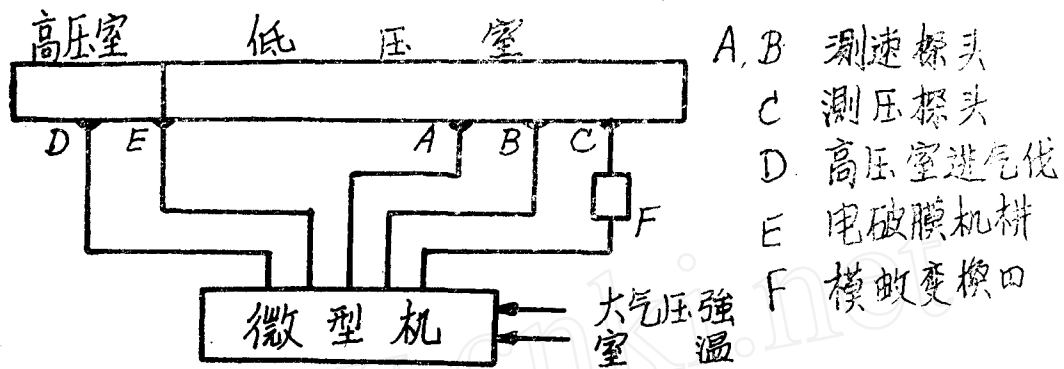


图5 击波管实验

夹好膜片后微型机即可开始操作。首先它发出操作讯号使高压室充气，待充气压力到达规定值后，便有讯号返回给微型机，再发出停止充气讯号。尔后发出破膜讯号，使电触针动作，便自动破膜。由A及B点送回其间的的时间间隔讯号，由C点传出的压力讯号经模——数变换后加到微型机的存贮器中去。根据所测的时间间隔，同时又知道了A、B点间的距离，再加上当时的温度及大气压强的修正，便可由微型机计算出激波压力的峰值。如果实验目的是标定压力探头，就可由微型机对上述的两个压力峰值进行比较，给出结果。在较高速度的爆炸力学实验中直接使用微型机，还待微型机速度进一步提高后才能广泛的应用。

爆炸力学测试技术如何赶超世界先进水平，我们认为应该抓好以下几个方面：

(1) 大力研制各种类型的传感器，尤其是传感器中的力学问题，从灵敏度、动态响应、扩大量程极限和改进动态校准等方面进行深入地努力，同时还要探讨新型的传感器。

(2) 改进野外现场测试条件，提倡小型、多点、直流、数字、遥测（控）化，逐步深入到爆源近区。

(3) 在实验室内尽量应用激光技术、电子计算技术和各种高速摄影，探索一些新的测试方法。

## 参 考 文 献

- [1] 五机部210所编, 国外科技资料(测试类), 58 (1977)
- [2] Dick, R.D., et al., Rev.Sci.Instr., 36 (1965), 143.
- [3] Linde, R.K., et al., Rev.Sci.Instr., 35 (1964) 466—468.
- [4] Keeler, R.N., Shock waves in condensed media.
- [5] Ingram, G.E., et al., AD—712081.
- [6] Doran, D.G., Measurement of shock pressures in solids, in Highpressure measurement, Washington, (1963)
- [7] Deal, W.E., Dynamic high—pressure techniques in Modern very high pressure techniques, Washington, (1962)
- [8] Wasley, R.J. et al., Rev.Sci.Instr.35 (1964) 1927.
- [9] Davis, W.C. et al., Rev.Sci.Instr.32 (1961) 579.
- [10] Wackele, J., J.A.P.33(1962) 922.
- [11] Barker, L.M. et al., Rev.Sci.Instr.36 (1965) 1617.
- [12] Hughes, D.S. et al., J.A.P.32 (1961) 624—629.
- [13] Rice, M.H., Rev.Sci.Instr.32 (1961) 447—451.
- [14] Taylor, J.W. et al., J.A.P.34 (1963) 364—371.
- [15] Burke, J.J. et al., Shock wave and the mechanical properties of solids, 137.
- [16] Barker, L.M. et al., J.A.P.37 (1966) 1989—1991.
- [17] Johnson, P.M. et al., Rev.Sci.Instr.39 (1968) 1100—1103.
- [18] Dolse, S.R., Rev.Sci.Instr.45 (1974) 499—505.
- [19] Edwards, D.H. et al., J.Sci.Instr.41 (1964)
- [20] Pierce, D., Royal aircraft establishment tech.note AERO 2953 (1963)
- [21] Bagnoff, D., Rev.Sci.Instr.35 3 (1964) .
- [22] Wenzel, A.B. et al., ISA Trans 13 3 (1974) .
- [23] Holingren, W.A. et al., ISA Trans 7 3 (1968) .
- [24] Bynum, D.S. et al., AD—716617 (1970) .
- [25] Schweppe, J.L., NBS monograph 67 (1963) .
- [26] Graham, R.A. et al., J.A.P.36 (1965) 1775.
- [27] Graham, R.A., Behavior of dense media under high dynamic pressure, Symposium of high dynamic pressure, Gordon and Breach, (1968) 469.
- [28] Young, C. et al., Proc. of sagamore conf. on shock waves and the

mechanical properties of solids, Army mechanics and materials research center, (1970) .

- [29] Barsis, E. et al., J.A.P.41 (1970) 5155.
- [30] Williams, R. et al., Bull Am.Phys.Soc—Series I 12 (1968) 1127.
- [31] Williamo, E.O., ISA Trans. 7 (1968) 223.
- [32] Heusinkveld, M., AEC pne 105p.
- [33] Keough, D.D., AD—709438 (NASA2508) .
- [34] Sharpe, W.N., Exp.mechanics 10 10 (1970) .
- [35] Bell, J.F., Proc.SESA 24 1 (1967) .
- [36] Sharpe, W.N., Exp.mechanics 10 2 (1970) .
- [37] 中国科学院力学研究所二室, 力学情报, 2 (1974) .
- [38] Palmer, E.P., J.A.P.35 (1964) 3055.
- [39] Youn, S.W. et al., Appl.Sci.Rev.24 (1971) 431—451.
- [40] AD—710229 (1970) .
- [41] 产品说明书
- [42] 田中一三, 工业火药, 35 (1974) 86—89.
- [43] 坪井 净, 电子科学, 27 (1977) 59—62.