

# 凝聚态炸药爆轰测试技术研究进展\*

龙新平<sup>1,†</sup> 蒋治海<sup>2</sup> 李志鹏<sup>2</sup> 魏贤凤<sup>3</sup> 韩勇<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中国工程物理研究院, 绵阳 621900

<sup>2</sup> 中国工程物理研究院化工材料研究所, 绵阳 621900

<sup>3</sup> 北京理工大学机电工程学院, 北京 100081

**摘要** 爆轰物理学科仍然是以实验为主的一门科学, 爆轰测试技术的不断进步仍然是爆轰物理学科发展的主要推动力. 本文在阐述凝聚态炸药爆轰性能主要几个研究方面的基础上, 从光学测试技术和电学测试技术两个方面系统介绍了凝聚态炸药爆轰测试技术及其应用. 通过对现代爆轰测试技术进展的阐述, 分析了凝聚态炸药爆轰测试研究面临的问题, 展望了爆轰测试技术的发展前景.

**关键词** 爆炸力学, 凝聚态炸药, 测试技术

## 1 引言

炸药发明距今已有千余年的历史, 根据物态性质的不同, 可将炸药分为气态、液态和固态, 一般将液态和固态炸药统称为凝聚态炸药, 由于凝聚态炸药具有密度高、爆速高和爆压高, 能量密度高等特点, 并且便于运输、储存、加工和使用, 因而广泛应用在军事和民用上<sup>[1]</sup>.

爆轰物理是研究炸药爆轰过程中复杂的力学、化学和物理特性的一门学科, 其研究内容包括试验测试技术、爆轰理论和数值计算分析等. 目前, 爆轰测试技术的不断进步仍然是爆轰物理学科发展的主要推动力. 近年, 随着电子技术、光学技术的发展, 爆轰测试技术也得到了极大的提高, 爆轰物理研究逐渐从宏观的唯象研究向着介观和微观的、本质的研究阶段发展<sup>[2]</sup>. 高时间分辨率、高带宽的数字示波器的出现, 使精确测试炸药爆轰波的传播过程成为可能<sup>[3]</sup>; 超高速电子变相管相机<sup>[4]</sup>的出现, 记录幅频由每秒几千幅发展到每秒百亿幅, 使高速记录动态爆炸过程成为可能; 激光干涉技术的发展, 使精确测试物质速度历程成为可能<sup>[5-6]</sup>; 瞬态光谱测试技术的发展, 使准确分辨炸药爆轰的反应历程成为可能<sup>[7]</sup>; 各种基于瞬

态压电、压阻、电磁等效效应建立起的传感器技术的发展, 为有效表征炸药的相关爆轰现象提供了多种手段<sup>[8]</sup>.

本文在简要介绍凝聚态炸药爆轰研究内容、实验方法和实验手段的基础上, 从凝聚态炸药爆轰光学测试技术和电学测试技术方面系统介绍了凝聚态炸药爆轰测试技术的研究进展, 通过对现代爆轰测试技术进展的阐述, 展望了爆轰测试技术的发展方向.

## 2 凝聚态炸药爆轰研究

凝聚态炸药爆轰研究主要包括炸药的起爆、炸药的爆轰特性、炸药的爆轰传播规律和炸药的爆炸效应 4 个方面.

### 2.1 凝聚态炸药的起爆

认识和掌握凝聚态炸药的起爆问题对提高武器系统和工业应用炸药的可靠性和安全性具有十分重要的意义. 从物理机制上, 凝聚态炸药的起爆有两种方式, 热起爆和冲击起爆<sup>[9]</sup>. 有关凝聚态炸药起爆的研究主要包括冲击起爆 (shock to detonation transition, SDT)<sup>[10]</sup>、燃烧转爆轰 (deflagration to detonation transition, DDT)<sup>[11]</sup> 和迟滞爆轰 (de-

收稿日期: 2010-10-22, 修回日期: 2011-08-17

\* 国家自然科学基金 NSAF 联合基金重点项目 (10676120), 中国工程物理研究院科学技术发展基金项目 (2008A0101003) 资助

† E-mail: longxinping@vip.sina.com

layed detonation, XDT)<sup>[12]</sup>.

### 2.1.1 冲击起爆 (SDT)

在强冲击作用下,凝聚态炸药会瞬时起爆,这一过程称为炸药的 SDT. 关于 SDT 的研究对于不定常爆轰理论模型的发展有重要意义,也是实际引爆、传爆系列相关技术的主要基础. 隔板试验<sup>[13]</sup>、水箱试验<sup>[14]</sup>、飞片撞击试验<sup>[15]</sup>和楔形试验<sup>[16]</sup>等试验方法均是用于测定炸药冲击起爆性能的典型方法,相应使用的测试手段包括压力计、电探针、高速扫描/分幅相机、激光速度干涉仪、电磁粒子速度计、瞬态光谱仪等. 通过对试验结果的归纳和分析,研究人员对凝聚态炸药的冲击起爆机理逐渐形成一定共识. 对于均质炸药,在冲击波进入炸药后,在波阵面后首先受到冲击的一层炸药整体被加热,激发爆轰化学反应,形成超速爆轰波,该超速爆轰波赶上初始入射冲击波后在未受冲击的炸药中发展成稳定的爆轰<sup>[17]</sup>. 对于非均质炸药,目前较为公认的是冲击作用下炸药内部产生局部的高温区,形成热点,从而进一步引起非均质炸药的起爆. 根据冲击作用下热点形成的力学机制不同,人们提出了多种模型,如流体动力学热点、晶体的位错运动和晶粒之间的摩擦产生的热点、剪切带形成的热点、微孔洞弹黏塑性塌缩形成的热点等.

### 2.1.2 燃烧转爆轰 (DDT)

在一定外界条件下,炸药燃烧可以转化为爆轰,这一转化过程被称作 DDT, 此类现象一般有缓慢的发展阶段和较突然的转变阶段. 在固体火箭发动机和火炮药室内的工作过程中,或当爆炸装置遇到火烧事故时可能发生此现象. DDT 管试验<sup>[18]</sup>是研究炸药 DDT 现象的主要方法,一般是用较长的金属管或其他材料作为填充炸药样品的容器,圆管一段用点火头或用活塞压缩加载,应用的测试传感器主要有应变片、压力计、电探针和光纤探针等,用于测量压力波和燃烧阵面的轨迹,在 DDT 研究中,还常应用 X 闪光照相测量 DDT 管内炸药的密度分布. 目前,关于 DDT 机理主要分为两类<sup>[19]</sup>: 一类是,压缩波转化为强冲击波,强冲击波引发爆轰;另一类是,炸药内局部温度骤升,形成“热爆炸”,压缩波导致高压,引发爆轰. 由于 DDT 管的尺寸、材料强度等对 DDT 过程影响很大,部分实验数据存在着自相矛盾,说明实验测试研究尚未成熟,尚需进一步研究新的实验方法和精密测试技术,以认清 DDT 发生的条件和机理.

### 2.1.3 迟滞爆轰 (XDT)

在某些特定条件下,炸药在受到低强度冲击作用后,也会发生爆炸. 这个低冲击强度要比 SDT 阈值低得多,起爆时间比 SDT 有显著延长,这一现象被称为炸药的迟滞爆轰 (XDT). 炸药战斗部、爆炸装置等跌落、碰撞和长杆破片撞击等长脉冲低压刺激下,可能发生此现象. 隔板试验、射弹撞击试验和活塞压缩试验<sup>[20]</sup>等试验方法均是用于研究炸药 XDT 现象的典型方法,相应使用的测试手段包括压力计、电探针、高速分幅/扫描照相机和 X 闪光照相机等测试技术. 国外研究人员进行了大量 XDT 试验研究工作,积累了许多成果. 关于 XDT 现象可能的热点机理归纳起来主要有 5 种<sup>[21]</sup>: (1) 孔洞的产生和再压缩; (2) 样品与金属界面的摩擦; (3) 裂纹的产生和汇聚及摩擦; (4) 塑性功; (5) 剪切带.

## 2.2 炸药爆轰特性

炸药爆轰特性是表征炸药性能的重要指标,对正确认识及合理使用炸药具有十分重要的意义. 有关凝聚态炸药爆轰特性的研究主要包括炸药爆轰性能和炸药的化学反应区结构等.

### 2.2.1 炸药爆轰性能

炸药的爆轰性能主要包括爆速、爆压、爆温、爆热和爆容等,这些参数是表征炸药性能的基础参数. 其中,炸药爆速是目前能够最为精确获得的参数,实验方法包括电探针测时法、光纤测时法和高速摄影法等,相应使用到的测试手段包括电探针、光纤、高速扫描相机和变相管相机等. 测试炸药爆压的实验方法包括自由表面速度法<sup>[22]</sup>、阻抗匹配法<sup>[23]</sup>、电磁法<sup>[24]</sup>和锰铜压阻传感器法<sup>[25]</sup>等,相应使用到的测试手段包括高速扫描相机、激光速度干涉仪、电磁粒子速度计和压力计等. 由于炸药爆轰区温度变化迅速及界面的光谱辐射等复杂问题,炸药爆温的测量目前仍然是相当困难的,但是已有了一定进展,实验方法主要包括发射光谱法<sup>[26]</sup>、拉曼散射法<sup>[27]</sup>和热电偶方法<sup>[28]</sup>,相应使用到的测试手段包括瞬态高温计、拉曼光谱仪和热电偶等. 测试炸药爆热的实验方法包括恒温法和绝热法,测试炸药爆容的实验方法为压力法,相应使用到的测试手段包括温度计、压力计等.

### 2.2.2 炸药的化学反应区结构

炸药的化学反应区结构影响着炸药的爆轰性能参数,也决定着炸药的后续能量释放情况,与

炸药的爆炸驱动能力有着密不可分的关系. 测试炸药爆轰反应区结构的方法主要有金属自由表面法、电磁法、VISAR/DISAR (velocity interferometer system for any reactor/displacement interferometer system for any reflector) 测试界面速度法<sup>[29]</sup>、电导率测试方法<sup>[30]</sup>和光电测试界面温度方法<sup>[31]</sup>等. 相应使用到的测试手段包括电探针、粒子速度计、VISAR/DISAR 和瞬态高温计等. 现有研究表明炸药的化学反应区结构受多种因素的影响, 如炸药的密度、炸药直径、装药长度和约束条件等.

### 2.3 炸药爆轰传播规律

炸药爆轰波的传播可分为定常和不定常两种, 爆轰波的定常传播是一种基于经典 CJ 爆轰理论和爆轰波结构 ZND 模型的理想传播状态. 实际应用的凝聚炸药, 会出现散心爆轰、聚心爆轰以及螺旋爆轰等不定常爆轰现象<sup>[1]</sup>. 在散心爆轰理论研究方面, 20 世纪 80 年代, 在 Whitham 冲击波动力学的基础上, Bdzil, Stewart, Lambourn 等学者提出了爆轰冲击波动力学 (detonation shock dynamics, DSD) 理论<sup>[32]</sup>. DSD 理论较好地解决了反应速率与波阵面曲率之间的关系, 通过与 LS(level set) 方法结合, 可将 DSD 理论推广到三维情形<sup>[33]</sup>.

炸药的非常定常爆轰是炸药实际应用中必须关注的问题, 主要包括炸药的临界直径效应、拐角效应等. 利用其非常定常爆轰传播特性, 可实现将炸药由单一的做功材料发展为多种应用的材料, 如各种爆炸逻辑网络等. 测试炸药的非常定常爆轰特性的实验方法有熄爆厚度试验<sup>[34]</sup>、“蘑菇”(mushroom) 试验<sup>[35]</sup>和“洋葱皮”(onion) 试验<sup>[36]</sup>等. 相应使用到的测试手段包括电探针、高速扫描相机、光纤探针、光纤传感技术等.

### 2.4 炸药的爆轰效应

炸药爆轰后, 爆轰产物驱动周围介质 (金属、液体、气体和岩土等), 引起这些介质产生爆炸 (冲击) 波, 从而产生破坏效应. 此方面的研究与武器威力评估、爆炸加工以及爆破安全等应用问题密切相关. 实验方法包括圆筒试验<sup>[37]</sup>、平面飞片试验<sup>[38]</sup>、板痕试验<sup>[39]</sup>等. 相应测试手段包括高速扫描相机、电探针和高速录像机等.

## 3 凝聚态炸药爆轰测试技术及其应用

根据凝聚态炸药爆轰研究所应用到的测试技

术, 大体可分为光学测试技术、电学测试技术和光电综合应用测试技术. 由于光电综合应用测试技术一般是光学探头接收光信号, 通过光电转换成电信号, 因此, 本文将将其归为光学测试技术.

### 3.1 光学测试技术及其应用

目前, 爆轰物理精密测试中的光学方法主要包括 VISAR/DISAR 测试技术、瞬态光谱法、高速摄影法、质子照相技术等.

#### 3.1.1 VISAR/DISAR 测试技术

激光干涉测速技术的基本原理是基于光学多普勒频移效应, 利用激光的相干性对目标进行光学上的差频干涉测量, 通过记录运动介质在不同时间反射光的差拍频率, 获得运动介质的速度-时间历程. 激光干涉测速技术的时间分辨率为纳秒量级, 测速精确度高 (1%~3%), 测量动态范围大, 具有“非接触测量”和“高时间/空间分辨率”两大优点.

1964 年, Yeh 和 Cummins<sup>[40]</sup> 首先提出利用散射激光束的多普勒频移来测量流体速度的激光测量技术, 同年世界上首次出现了激光多普勒测速仪 (laser Doppler anemometer, LDA), 揭开了激光多普勒测速技术的历史. 1966 年, Barker 等<sup>[41]</sup> 最先将激光位移干涉测量技术用于爆轰物理研究, 测量了铝在低压爆轰过程中的位移和粒子速度. 经过四十多年年的发展, 先后出现了激光位移干涉测速技术<sup>[42]</sup>、激光干涉测速技术<sup>[43]</sup>、任意反射面激光干涉测速技术 (VISAR)<sup>[44]</sup>、全光纤任意反射面激光干涉测速技术<sup>[45]</sup>、激光多普勒差拍技术<sup>[46]</sup>、全光纤位移干涉仪 (All-fiber displacement interferometer system for any reflector, AFDISAR)<sup>[47]</sup>.

目前, 激光干涉测速技术已成为冲击波物理和爆轰物理研究中的标准实验技术之一, 在凝聚态炸药爆轰性能、电炮、常规武器等众多研究领域得到了广泛应用. 作为速度测试的主要手段, 广泛用于研究凝聚态炸药的做功能力、反应速率、反应区结构等方面. 1999 年, 龙新平等<sup>[48]</sup> 采用 VISAR 准确测得了不同尺寸铝粉、不同平板厚度、主炸药有无约束等条件下含铝炸药爆轰驱动飞片的速度-时间历程. 试验结果表明: 铝粉颗粒尺寸对炸药的做功能力和反应时间具有显著的影响, 较大尺寸铝粉含铝炸药能量释放相对缓慢, 主要集中在炸药爆轰反应的后期参加反应, 纳米铝粉含铝炸药具有较短的反应时间和较高的做功能力; 铝粉反应情况与炸药约束条件密切相关, 有约束

条件下能量释放时间明显加长, 且对飞片的做功能力更强. 2004 年, 何碧等<sup>[49]</sup>利用 VISAR 对金属箔电爆炸驱动小尺寸飞片速度变化进行了测量, 获得了信噪比好、能正确反映爆炸箔起爆器驱动飞片的速度-时间历程, 得到的飞片加速时间、加速过程的飞行距离与冲击片雷管的设计参数具有良好的一致性. 2007 年, 李志鹏等<sup>[50]</sup>采用双灵敏度 VISAR 对 JB-9014 炸药进行了大板实验驱动飞片研究, 实验较灵敏地反映出了 JB-9014 炸药密度的变化对驱动铜飞片速度的影响, 发现在不同的半径位置处, 低密度 JB-9014 炸药驱动铜飞片的速度值要比高密度的小一些, 特别是在速度剖面的后面部分, 差别尤为明显.

炸药爆炸时化学反应十分迅速, 又具有高温高压作用, 试验观测爆轰反应过程难度很大. 常用的方法是在炸药中嵌入压力计或速度计, 测量内部不同位置的应力或速度变化, 应用拉氏分析方法来确定炸药的速率函数. 尽管埋入计的尺寸很小, 但仍然会对炸药爆轰反应流场产生影响, 测试方法存在一定的局限性. 而采用 VISAR 技术测量炸药与窗口界面的粒子速度来推算炸药的爆轰反应过程, 具有不改变炸药本身反应条件, 间接记录炸药反应过程的优点. 2003 年, 陈朗等<sup>[38]</sup>测量了含铝炸药和窗口界面粒子速度-时间曲线, 发现爆轰波到达窗口界面时, 界面粒子速度迅速升高, 在  $0.1 \mu\text{s}$  左右到达最大值, 此后速度下降, 在  $0.9 \mu\text{s}$  后速度缓慢下降, 曲线中出现了拐点, 可被认为是炸药组分的爆轰反应结束点 (CJ 点), 其后为炸药爆轰产物与铝粉的反应阶段. 彭其先等<sup>[51]</sup>采用双灵敏度 VISAR 测试技术, 获得了点起爆方式下 TNT 炸药-LiF 晶体界面的粒子速度历程, 通过曲线上明显的 CJ 爆轰点得到 TNT 炸药的反应区持续时间约为  $100 \text{ ns}$ , 对应的化学反应区厚度为  $0.135 \text{ mm}$ .

2004 年, 美国 LLNL 报道了一种新的测速技术——激光多普勒差拍测速技术<sup>[46]</sup>, 它的本质是激光位移干涉测量技术, 通过使用光通讯技术中的单模光纤、耦合器件, 以及超高带宽探测器和示波器, 将传统位移干涉仪中记录系统硬件带宽提高一个量级以上. 翁继东等<sup>[52]</sup>报导了一种高时间分辨率的全光纤位移干涉仪, 称为 AFDISAR. 该系统除了可达  $50 \text{ ps}$  的高分辨率外, 另一优点是系统自身带宽非常大, 很少丢失条纹, 即使丢失也不影响测速结果. 2009 年, 中国工程物理研究院流体物理研究所成功研制了 CAEP-IFP-DISAR-01<sup>[47]</sup>, 采

用全光纤结构, 具有测速范围宽广、结构简单、体积小、抗振动、免调试和可靠性高等特点. 王德田等<sup>[53]</sup>通过空腔加载实验和接触爆轰实验, 与标准的测速仪器 VISAR 进行了对比实验, 得到了很好的一致性, 证明了位移干涉仪在爆轰物理中应用的可行性.

### 3.1.2 光谱测试技术

光谱测试技术是利用被测目标在多个波长下的光辐射信息, 经过数据处理同时得到目标的真实温度和光谱发射率. 在爆轰过程中, 化学反应区很窄, 化学反应能量在几十纳秒时间内释放出来, 因此可将该区的辐射视为黑体辐射. 光谱测试具有不用剖开炸药、不受炸药与窗口材料界面扰动的影响、信号前沿上升快、测试精度高等优点, 在研究炸药爆轰波阵面的温度和炸药反应区结构方面得到了广泛的应用.

#### 3.1.2.1 爆温研究

炸药爆温是指炸药爆炸时放出的能量将爆炸产物加热到的最高温度, 存在时间短、温度高, 是炸药多个爆轰参量中最难测量且没有标准的量. 由于缺乏准确的爆温数据, 爆轰产物的状态方程只能依靠动力学参量 (如爆速、爆压) 近似估计, 通常会产生较大的偏差, 影响新型炸药的研制与开发, 以及战斗部设计水平的提高, 这对人们深入爆轰过程的研究、优化炸药配方和最大限度使用炸药是很不利的. 因此, 炸药爆温的准确测量是多年来国内外学者们积极研究的关键课题.

1958 年, Gibson 等<sup>[54]</sup>采用光电比色法首次测得了凝聚炸药的爆温, 把爆炸产生的光辐射信号经光电转换由普朗克辐射定律达到温度测量的目的. 1985 年, He 等<sup>[55]</sup>改进了 Gibson 的方法, 用光纤代替了原来的光学传输和接收系统, 改善了装置结构, 并利用该装置测量了 TNT ( $1.560 \text{ g/cm}^3$ ), Tetrl ( $1.631 \text{ g/cm}^3$ ), HMX ( $1.763 \text{ g/cm}^3$ ) 和 PETN ( $1.709 \text{ g/cm}^3$ ) 4 种高能炸药的爆温, 4 种炸药的爆温分别为  $2587 \text{ K}$ ,  $3054 \text{ K}$ ,  $3038 \text{ K}$  和  $3816 \text{ K}$ . 为了进一步提高炸药爆温测量的精度, Kato 等<sup>[56]</sup>研制了四通道高温计, 在光电比色法的基础上增加了两个波长通道, 消除了光电比色法在原理上假定的待测光源为黑体所带来的误差.

为了研究实际光源的温度测量, 1994 年, 日本研究者提出了对可见光区域的整个辐射谱进行测量的方法 (光纤光谱法)<sup>[57]</sup>. 将光纤垂直于爆轰波传播方向插入炸药, 把爆轰光波导引出来, 用 PIN

快速响应探测器采集光信号,并转换成电信号后用示波器记录,通过光学多通道分析仪(OMA)得到爆轰光谱,再用普朗克公式按最小二乘法原则拟合得到爆温.通过引入光纤及OMA系统采集信号,避免了复杂的同步工作,克服了传统光谱测爆温技术的局限,得到炸药反应区的光谱信息.2003年,白永林等<sup>[58]</sup>对液体炸药硝基甲烷的爆温进行了测量,取得了较为满意的测量结果,其爆温为3672 K,扩展不确定度为100 K.2005年,王翔<sup>[31]</sup>通过二级轻气炮加速铜飞片撞击起爆炸药,产生的飞片速度为3.26 km/s,通过冲击压缩关系式计算出炸药样品中的初始压力为34.6 GPa.利用光纤光谱法测得了TNT炸药(1.618 g/cm<sup>3</sup>)在超压下的爆轰温度为(3173±44) K.

2007年,郭学永等<sup>[59]</sup>根据原子发射双谱线测温法设计的光纤光谱测温系统,可实现瞬态温度的实时测量,为非理想炸药的爆炸产物温度测量提供了一种简单有效的方法.获得了两个配方含铝乳胶炸药爆炸产物瞬态温度-时间分布曲线,爆炸产物温度分别在爆炸后195 μs和180 μs达到最大值,分别为2950 K和2750 K.试验结果表明,非理想炸药的爆炸产物温度与炸药组成密切相关,随爆炸发展有一个递增的过程,且爆炸反应持续时间比理想炸药明显延长.

目前炸药爆温测量精度仍然不高,其原因还在于爆轰中的炸药和产物是一个空时分布的瞬态温度场,某些部分可能是非平衡的,把它等效成一个单温的黑体或灰体,并且不考虑光辐射在通过未反应炸药、产物气体、周围介质和传输介质(窗口、光纤等等)之后的谱分布,在理论上过于简化<sup>[60]</sup>.

### 3.1.2.2 反应区结构研究

随着光谱测试技术的不断改进和完善,测试精度不断提高,目前已应用到炸药反应区结构的试验研究中.

1962年,Peresson等<sup>[61]</sup>最早用光电技术对Comp.B炸药爆轰反应区结构进行了探索性研究,其时间精度为2 μs.1984年,Voskoboinikov等<sup>[62]</sup>对一些固体炸药的反应区结构进行了研究,其时间精度为30 ns,但这样的精度用于研究以HMX和RDX为基的反应区很窄的炸药并不精确.20世纪90年代俄罗斯技术研究院原子能中心的Lubyatinsky等<sup>[63]</sup>对其进行了改进,使其时间测量精度大大提高,达到5 ns.他们利用该方法对多种高能炸药的反应区结构又进行了一系列研究,发

现装药密度对炸药爆轰反应区宽度有明显的影响,并且反应时间与CJ压力直接相关,但与炸药感度关系不大.2000年,中国工程物理研究院的赵同虎等<sup>[64]</sup>借鉴Lubyatinsky等的方法,利用六通道瞬态光学高温计对JB-9014炸药的反应区的结构也进行了研究,通过计算得到了密度为1.894 g/cm<sup>3</sup>的JB-9014炸药的反应时间为0.31 μs,反应区宽度为1.75 mm, von Neumann峰值压力为36.5 GPa.

2005年,王翔<sup>[31]</sup>采用高温计测试了JO-9159炸药的反应区结构.通过示波器记录被测炸药端面窗口材料中冲击波前沿的发光强度-时间的变化曲线,获得冲击波在窗口材料中的温度,计算出炸药与窗口材料的界面速度,由界面连续性条件及镜像反演现象反推炸药的反应区结构参数.当装药密度分别为1.848 g/cm<sup>3</sup>和1.658 g/cm<sup>3</sup>时,化学反应时间分别为36 ns和25 ns,反应区宽度分别为0.18 mm和0.11 mm,与电磁法的结果基本一致,证明了光谱法研究炸药反应区结构的可行性.

### 3.1.3 高速摄影技术

高速摄影具有高响应速率、高空间分辨率和高时间分辨率,能够把物体的高速运动和变化过程拍摄下来,在炸药爆轰性能、高速碰撞、爆炸力学等领域成为有效的研究手段.常用的高速摄影方法有高速扫描/分幅摄影技术、纹影技术、脉冲X光摄影技术/质子照相技术、高速录像技术和全息高速摄影技术.

#### 3.1.3.1 高速扫描/分幅摄影技术

高速扫描摄影技术在狭缝方向上能连续记录物体高速运动的过程,时间分辨率达到纳秒量级.在炸药、火工品性能检测方面,主要应用于包括平面波透镜的波形检测、冲击片雷管的波形差及同步性检测、网络板各点起爆的同步性及爆速测试、圆筒试验<sup>[65]</sup>、有机玻璃爆压测试、K值试验等方面.高速分幅摄影技术的时间坐标是间断的,时间分辨率低于扫描摄影,但获得的空间信息量大,能够对变化过程进行逐幅顺序不连续拍摄,从而记录不同时刻变化过程的图像.通过时间放大技术,能够把系列分幅图像变成连续动画,直观地反映物体快速运动过程的变化情况.分幅摄影技术主要用于爆轰波传爆及相互作用过程研究、爆炸驱动装置壳体的膨胀(或压缩)破裂过程的动态诊断<sup>[66]</sup>、燃料空气炸药(FAE)战斗部液体燃料射流形成发展过程的基础研究、炸药爆炸驱动液体内外界面的膨胀过程及不稳定性研究<sup>[67]</sup>等领域.

### 3.1.3.2 纹影技术

纹影技术又称为施利伦 (Schlieren) 技术, 是近几年逐渐被大家认识的一种摄影技术, 其原理是利用气流对光波的扰动, 将肉眼不能观察到的气流变化, 转化成可以被看见的图像. 这项技术最初被应用于风洞的气流研究, 特别是高速激波的研究 [68]. 将高速相机与纹影技术结合起来便形成了高速纹影技术, 近年来常用于爆轰与冲击波物理的实验研究. 2000 年, Thomas 等 [69] 利用纹影技术对射流点火引发爆轰过程进行了研究, 通过拍摄射流在面积突变区的衍射现象, 发现了火焰在较大区域内有明显的加速. 2004 年, 胡栋等 [70] 利用纹影技术对炸药爆炸变形和首次破碎进行研究, 成功得到了爆轰后驱动物质的变形过程. 2006 年, 畅里华等 [71] 研制了一套超高速投射式纹影系统, 他们利用这套系统研究了凝聚态炸药爆轰形成高压条件下金属表面喷射过程, 研究清楚显示了自由面空气冲击波及波阵面, 冲击波尖端的针状喷射也非常清晰; 同时他们还研究了凝聚态炸药爆轰形成的冲击波在有机玻璃中的传播过程, 获得了清晰的纹影照片.

### 3.1.3.3 脉冲 X 光摄影技术/质子照相技术

脉冲 X 光摄影技术主要是利用 X 射线极强的穿透能力, 其原理是利用不同材料吸收 X 射线的的能力不同, 或者同一材料在冲击压缩下密度变化导致对 X 射线衰减程度的不同, 使放置在被测试物质后方的底片感光成像, 得到被测试物质的形状、界面、缺陷和密度分布等内部的物理图像. 采用强流直线感应电子加速器作为脉冲电子束源的 X 射线装置和先进图像处理系统, 大大提高了技术性能, 在冲击波相互作用、炸药延迟起爆 (XDT) 及爆轰参数测量、聚能装药射流、自锻弹丸形成和侵靶过程等方面得到了广泛的应用.

质子照相技术的原理与 X 射线相同, 通过测量入射到物体上的粒子束衰减来确定被测物体的物理性质和几何结构. 与 X 光照相技术相比, 高能质子照相在穿透能力、材料精细结构识别、探测效率和空间分辨率等方面性能更高, 能多角度、多幅连续拍照, 精细地辨别膨胀/压缩的细节, 更加容易判断冲击波和混合物随时间变化的情况. 近些年, 美国、俄罗斯采用质子照相技术开展了高能炸药的爆轰特性实验、强冲击加载条件下材料的复杂响应实验 (失效、不稳定性), 以及验证内爆过程后期的材料动力学和材料状态的实验.

Ferm 等 [72] 采用质子照相技术, 开展了炸药传爆过程的拐角试验研究, 通过炸药爆轰波阵面拐角翻转的辐射照片, 获得了爆轰波前沿、拐角距离、死区边沿及尾部的微观特征. 另外, 他利用质子照相技术通过对 PBX-9502 锥形药柱的传爆过程进行了试验研究, 测得了炸药传爆过程的辐射图像. 通过对图像进行分析, 获得了 PBX-9502 炸药的熄爆直径, 熄爆从药柱边沿向中心发展演变过程的微观信息, 熄爆前炸药的反应情况, 以及药柱内外部冲击波和爆轰波传播的具体细节.

Smilowitz 等 [73] 根据测得的 PBX9501 炸药热爆炸过程的质子照相图片, 观测到导致热爆炸的热轨迹发展, 获得了炸药从  $\beta$  到  $\delta$  相变阶段的膨胀和运动情况, 以及中心起爆空间炸药的密度变化.

### 3.1.3.4 高速录像技术

高速录像技术是综合利用光、电、机、光电传感器与计算机等一系列技术, 曝光时间从千分之一秒到百亿分之一秒之间的特殊摄影技术. 能够记录高速运动过程的某一瞬时状态或全部历程的有效手段. 高速录像技术在高速碰撞、爆炸力学等研究领域发挥了巨大作用.

高速录像设备主要包括高速数字摄像机和变相管相机两种. 高速数字摄像机的曝光时间一般在从千分之一秒到几十万分之一秒之间, 常用于云爆/温压过程及凝聚态炸药的爆炸破坏效应研究. 2005 年, 郭学永等 [74] 通过高速录像对 3 种量级 (5 kg, 20 kg, 50 kg) FAE 装置的静爆实验进行了现场记录, 通过对燃料爆炸抛撒形成云雾的成长过程的实时记录结果进行分析, 并依据因爆炸驱动力和气动阻力的相互作用而导致的云雾径向膨胀速度发生变化的观点, 把燃料的爆炸抛撒过程分为 3 个阶段: 喷出阶段、过渡阶段和膨胀阶段. 2006 年, 代晓淦等 [75] 采用 2 kg 钢质弹丸对 PBX-2、PBX-1 炸药进行了 Steven 试验, 通过高速录像照片估算了点火反应的延迟时间.

高速变相管相机的时间分辨率和空间分辨率远远高于目前的高速转镜式相机, 在武器研制方面具有重要的意义. 世界发达国家特别是美国在 20 世纪 80 年代前就开展了这方面的研究工作, 多个研究机构已研制出高性能的变相管分幅相机, 其中斯坦福计算机光学公司研制的变相管相机幅频达到 0.2 ns/幅, 德国、俄罗斯、日本的产品也已达到相当高的水平. 目前, 国内高速变相管相机已发展到亿次/秒, 与世界发达国家同类产品相比, 在

相机的时间分辨率、空间分辨率、动态范围及调制传递函数四个参数方面与国外有较大差距。

### 3.1.3.5 全息摄影技术

全息摄影是利用波的干涉记录被摄物体反射(或透射)光波中信息(振幅、相位)的照相技术。全息摄影通过一束参考光和被摄物体上反射的光叠加在感光片上产生干涉条纹而成,不仅记录被摄物体反射光波的振幅(强度),而且还记录反射光波的相对相位。

1986年,马燮圻等<sup>[76]</sup>利用高速实时全息干涉摄影研究了固体火箭推进剂的燃烧,并获得成功。实验发现了双基推进剂燃烧表面上方高温反应中心的存在和变化规律。1989年,刘常龄等<sup>[77]</sup>利用全息摄影方法研究了爆炸产物阵面上微粒子场。测试结果表明,产物阵面微粒子约以5 km/s的速度飞散。2005年,龚敏等<sup>[78]</sup>实现了一次爆破加载获取4个动态过程爆破模型的全息干涉条纹图,成功得到了线型载荷爆破时质点离面位移振动的变化规律。

全息摄影能够解决爆轰研究中存在的一些问题,但是研究中也暴露出一些问题:实验成功率相当低、研究成本昂贵、实验非常复杂等。这些问题限制了全息摄影方法在凝聚态炸药爆轰研究中的应用。

## 3.2 电学测试技术及其应用

在凝聚态炸药爆轰性能的研究中,电学测试技术是一种非常重要的测试方法和手段,它可以将炸药爆轰过程中的物理或化学的效应通过传感器等探测元器件进行跟踪记录,从而对炸药的爆轰性能进行测试和研究。例如,电探针法就是利用炸药爆轰过程的电离效应或冲击作用,借助外电路,产生计时信号,测量爆轰过程的时间、速度、加速度等重要参数。

爆轰性能测试的电学方法主要包括电探针法、电磁法、压阻法和压电法等。随着科技的进步,这些方法的测试范围和精度等也在不断的提高和拓展,并且得到了越来越广泛的应用。以下重点对电磁粒子速度计、锰铜压阻传感器、聚偏二氟乙烯(polyvinylidene fluoride, PVDF)计以及电导率测试等方法的最新发展和应用情况进行了综述和归纳。

### 3.2.1 电磁粒子速度计测试方法

电磁粒子速度计测试技术(电磁法)是一项重要的爆轰测试方法。电磁粒子速度计工作原理为

法拉第电磁感应定律,具有设计原理简单、响应灵敏,绝缘要求不高,有效记录时间长等优点,非常适于测量反应流过程。因此,被广泛应用于炸药爆轰建立过程的研究。

#### 3.2.1.1 电磁粒子速度计的发展历程

电磁粒子速度计测试技术距今已经发展了50多年的历史。最早在1960年,俄国的Zaitzev等<sup>[79]</sup>用一个环形的电磁粒子速度计测量了炸药冲击起爆过程中的粒子速度剖面。经过多年的发展,电磁粒子速度计测试方法日趋成熟和完善。近年来,Los Alamos National Lab (LANL)的Sheffield等<sup>[80]</sup>把电磁速度计测试技术作了更深入的发展和运用,电磁粒子速度计也由原来的单“U”型计逐渐演变成包含有多个粒子速度计和冲击波跟踪器的组合式电磁粒子速度计,测试的精度和获得的信息量都有了很大程度的提高。电磁粒子速度计也已经广泛应用于高能钝感炸药的冲击起爆过程研究。

电磁粒子速度计测试技术在我国起步较晚。20世纪80年代初期,北京工业学院、西北核技术研究所、中国工程物理研究院以及国防科学技术大学等单位都建立了电磁粒子速度计测试技术。此后,电磁粒子速度计测试方法得到了一定的应用和发展<sup>[81-82]</sup>。

#### 3.2.1.2 电磁粒子速度计的试验方法

国外采用的典型电磁粒子速度计见图1所示,制作方法为:首先在一层厚度为25 μm的FEP(氟化乙丙烯)特氟隆绝缘层上镀一层5 μm厚的铝箔,然后经过涂层、曝光和蚀刻等工序使铝箔变成设计好的样式,最后在上方粘一层25 μm厚的FEP特氟隆绝缘层,整个量计的厚度大约为60 μm。速度计由多个“U”形电磁粒子速度计和“冲击波跟踪器”组合而成。图中形状象“马镫”的是粒子速度计,水平平行的部分在实验时切割磁力线产生感应电动势,是速度计的敏感单元。“锯齿”形状的为冲击波跟踪器,实验时可以对冲击波阵面的速度历程进行跟踪。图2所示分别为粒子速度计以及冲击波跟踪器测试得到的典型波形。

电磁粒子速度计同其他嵌入式量计一样,都会从不同程度上干扰真实的反应流场。王圣平等<sup>[83]</sup>通过研究发现,由于爆轰产物本身的导电性和产物造成速度计内阻的增加,速度计计箔的厚度对测量结果有较大影响。此外,速度计采用的材料也很重要。从冲击阻抗与爆轰产物的阻抗匹配关系来看,铝的密度与爆轰产物比较接近,阻抗匹



配较好。

由于电磁粒子速度计测量时需埋入炸药中进行,因此在装配时,速度计采用的埋入方式对测量结果的影响也很大. Erickson 等<sup>[84]</sup>研究了采用不同埋入方式的粒子速度计对实验结果的影响. Cau 等<sup>[85]</sup>则研究了计的倾斜放置对实验结果的影响。

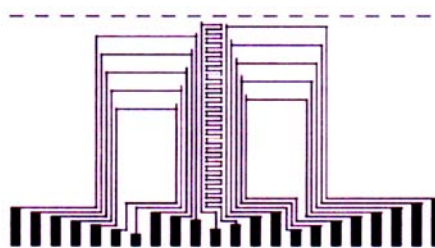


图 1 典型组合式电磁速度计示意图

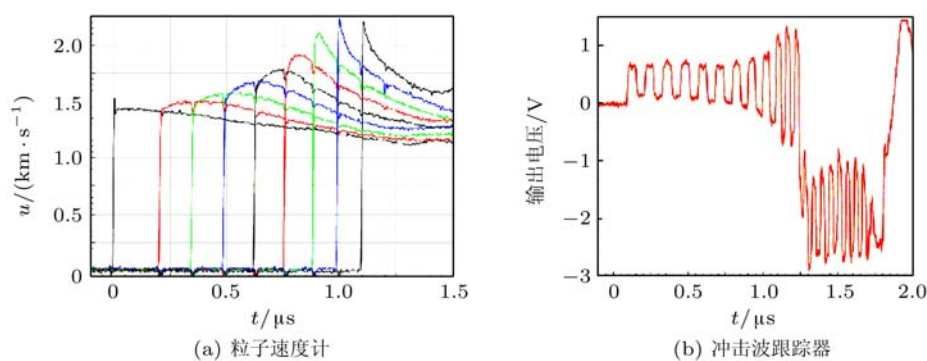


图 2 典型波形示意图

### 3.2.1.3 电磁粒子速度计的应用和发展

电磁粒子速度计测试技术作为研究爆轰波和冲击波在凝聚介质中传播的一个有力工具,具有重要的理论和实际意义. 随着电磁粒子速度计及其测试技术的不断改进和完善,电磁粒子速度计测试技术在国内外得到了多方面的应用。

1974 年, Jacobs 等<sup>[86]</sup>用电磁粒子速度计方法研究了铸装、压装 TNT 以及压装 Tetryl 的爆轰压力和反应时间. 1986 年, Vorthman 等<sup>[87]</sup>用电磁粒子速度计对炸药反应过程进行跟踪,然后对所测数据进行拉格朗日分析得到了炸药的经验反应速率函数. 此外,由于电磁粒子速度计可以对炸药冲击起爆过程进行较详细的记录,因此,用电磁粒子速度计对炸药冲击起爆过程进行测试也一直是研究的热点. Sheffield 等<sup>[88]</sup>利用组合式电磁粒子速度计对 PBX9501 炸药和 PBX9502 炸药的冲击起爆进行了研究. 并对粒子速度增长与冲击波波阵面之间的关系进行了分析,发现两种炸药都在一定程度上呈现混合相(既有均匀炸药,又有非均匀炸药的特点),但由于 PBX9501 炸药的粒子速度剖面中多数粒子速度增长滞后于冲击波前沿,因此认为 PBX9501 炸药较接近于均匀炸药,而 PBX9502 炸药的粒子速度剖面中多数粒子速度在波阵面上

就得到增长因而更接近于非均匀炸药. 此外,用电磁粒子速度计还可以研究炸药由于密度、添加剂以及孔隙度等的变化对其冲击感度的影响. Leiper 等<sup>[89]</sup>和 Gustavsen 等<sup>[90]</sup>进行了这方面的研究工作。

### 3.2.2 锰铜压阻法测试方法

锰铜压阻法是利用锰铜在压力作用下的压阻效应工作的一种压力测试传感器. 用锰铜材料制造压阻传感器,具有工艺简单,性能较稳定,温度系数小等特点. 所以在压阻法动态压力测量中锰铜压阻传感器的应用是最多的,也是最广泛的,现已成为国际上流行的动高压测量方法之一。

锰铜压阻传感器可以制作的既小且薄,又能较方便地嵌入被测样品材料内部而不明显影响原有压力场的分布,具有灵敏度高、响应快、线性较好等特点,非常适合于制作超高压传感器. 广泛应用于研究材料中弹塑性波的传播特性、动态断裂、层裂、相变、炸药爆轰过程以及火工品压力输出等方面。

#### 3.2.2.1 锰铜压阻传感器的发展历程

早在 20 世纪初,人们就发现了许多金属材料具有压阻特性. 在 1903 年 Lisell 等<sup>[91]</sup>就采用具



有压阻效应的锰铜作静压测量的传感器测量了流体静压力,但在一段相当长的时间内没有被人们重视.20世纪60年代以来,Fuller等<sup>[25]</sup>率先将锰铜传感器应用于动态高压的测试中.此后,随着研究工作的不断深入以及动态高压研究工作的开展,锰铜所具有的压阻灵敏度较高、温度系数很小等优势相对于其他材料凸现出来,人们陆续将其做成压力计应用于动态高压实验测量中,锰铜压阻法得到迅速发展.

### 3.2.2.2 锰铜压阻法的测试方法及原理

根据锰铜传感器材料的电阻率在高压作用下会发生变化,在保持材料尺寸不变时其电阻随压力的升高几乎呈线性地增加,而其电阻温度系数很小,因此可以认为在爆轰波或冲击波作用时锰铜材料的电阻率只受压力影响.

锰铜传感器一般具有线性的压阻关系,即

$$\Delta R/R_0 = k_p p \quad (1)$$

式中,  $k_p$  为压阻系数,即压阻传感器的灵敏度.当利用压阻传感器测量压力时,压阻系数  $k_p$  是已知的,因此只要测量到压阻计的相对电阻变化值  $\Delta R/R_0$ ,利用上式就可以确定作用于压阻计上的压力.

锰铜压阻传感器一般是和脉冲恒流源联合使用组成有源压力探测器.在恒流源向传感器提供恒流  $I$  的条件下,当传感器受到外界压力作用时,电阻变化和电阻上的电压变化存在如下关系

$$\Delta R/R_0 = I \Delta R / (I R_0) = \Delta V / V_0 \quad (2)$$

式中,  $V_0$  为加在  $R_0$  上的电压值,  $\Delta V$  为压力作用下电压的增加值,  $\Delta R/R_0$  为锰铜传感器的电阻变化率,  $\Delta V/V_0$  为对应电阻变化的电压变化率.而电压变化便于测量.该方法的使用需要预先标定锰铜传感器的压力与电压的关系曲线:  $p \sim \Delta V/V_0$ ,实验时只要精确测量电压变化  $\Delta V/V_0$ ,就可计算出实测压力值.

### 3.2.2.3 锰铜压阻法的发展和应用

锰铜压阻法测试广泛应用于炸药爆轰压力、冲击波压力测量以及火工元件爆炸输出冲击波压力测量等方面. Urtiew 等<sup>[92]</sup>用锰铜计研究了250°C下 LX-17 和 PBX-9502 炸药的冲击引爆压力场的发展过程.反应流动模拟结果表明:反应增长速率成几十倍的增加,而点火速率则可忽略,表明大多数热点瞬时进入反应增长阶段,它导致冲击

感度有本质的提高.池家春等<sup>[93]</sup>应用锰铜压阻传感器对钝感高能炸药 JB-9014 在常温和 -54°C 下冲击起爆压力场的发展进行了实验研究.在 -54°C 下压力场的发展图像揭示出 JB-9014 炸药遵循均质炸药起爆机理,而常温下的这种图像表明其兼备均质和非均质炸药起爆机理.梁增友等<sup>[94]</sup>在研究 PBX 炸药及其模拟材料冲击损伤效应试验时,利用锰铜压阻应力计测量了轻气炮驱动的飞片对炸药的撞击压力.

路光明等<sup>[95]</sup>采用锰铜压阻传感器对雷管内部不同截面处的爆压进行了测量,得到了较为满意的测试结果.严楠等<sup>[96]</sup>用锰铜压阻法对不同传感器保护介质、不同底壳形状及无底壳等条件下的雷管输出压力进行了测量研究,分析了各种因素对输出压力波形的影响.研究表明,平底雷管输出压力模拟信号上升前沿比凹底雷管和无底壳雷管的输出前沿要陡得多.韩秀凤等<sup>[97]</sup>解决了小尺寸非电火工元件输出测量时脉冲恒流源的启动问题,将锰铜压阻传感器成功应用于该类火工品的输出压力测试中.徐新春等<sup>[98]</sup>利用锰铜压阻传感器法测量了某聚奥传爆药在不同直径下的小尺寸装药爆轰输出冲击波经不同厚度有机玻璃隔板衰减后的冲击波压力,通过对实验数据进行拟合,得到了有机玻璃介质中冲击波衰减系数与装药直径的指数型关系.

锰铜压阻传感器仍处在不断发展中,其改进的脚步从未停止.杜晓松等<sup>[99]</sup>针对国防、军事等工业部门对压力测试的特殊需求,设计了一种三明治结构的薄膜锰铜传感器,提高了传感器高压测试极限和缩短了响应时间.实现了传感器有效量程为 1 ~ 80 GPa, 32 ns 的快速响应.性能明显优于普通箔式锰铜传感器的有效量程 1 ~ 50 GPa, 50 ns 响应时间的水平.段卓平等<sup>[100]</sup>针对国内中低压动态响应研究方面缺少相应的锰铜压阻计的问题,为中低压测量设计了高阻值锰铜压阻计,并进行了动态标定.结果表明所设计的箔式高阻值低压锰铜压阻应力计可满足低压冲击压力的测试要求.

### 3.2.3 PVDF 压电传感器测试方法

PVDF 压电传感器利用聚偏二氟乙烯独特的压电性能进行压力、速度、加速度等方面的测试.由于其具有机械柔韧性好、厚度薄、成本低、响应时间快等特点,不仅可以用来测试冲击波压力,还可以用来测量应变,已广泛应用于应力测试、高速撞击、爆炸、高能束流辐照等动态测量领域.

### 3.2.3.1 PVDF 压电传感器发展历程

1969 年 Kawai<sup>[101]</sup> 发现 PVDF 薄膜经过拉伸和极化处理后具有强压电特性, 自此 PVDF 压电薄膜在许多领域里都得到了应用. Bauer<sup>[102]</sup> 最初对 PVDF 的研究是将其作为爆炸点火器, 结果发现经特殊的极化处理后, PVDF 释放的电荷具有很好的重复性, 可作为冲击波传感器使用. 此后, 法国 ISL、美国 LLNL 和 Dynasen 公司、Ktech 公司等<sup>[103]</sup> 对其进行了大量的研究, 主要用于检测冲击、爆轰或高能离子辐照产生的冲击波压力. 由于 PVDF 薄膜具有响应时间短, 灵敏度很高, 在低压范围内有很好的信号输出, 因而 Reed 等<sup>[104]</sup> 认为 PVDF 冲击应力传感器的出现是对波剖面测量的一次革命, 目前在美国已形成了 PVDF 应力计的标准和商业化的产品. 我国与国外相比, 在 PVDF 应力计的制作和标定上还有一定的差距.

### 3.2.3.2 PVDF 压电传感器测试方法原理

PVDF 压电传感器的压电敏感元件是 PVDF 压电薄膜, 具有良好的压电特性. 其测试原理为: PVDF 压电薄膜受到冲击载荷  $P$  时, 其表面会产生电荷  $Q$ . 已证明  $P$  和  $Q$  之间在一定压力范围内呈单值函数关系为

$$Q = A \cdot K \cdot P \quad (3)$$

式中,  $K = K(P)$  为动态压电系数;  $A$  为压电薄膜传感器的敏感部分面积.

实际测量时, 当 PVDF 压电薄膜受冲击应力作用后, PVDF 产生电荷量  $Q$ ,  $Q$  经电阻  $R$  放电形成电流回路  $I(t)$ , 用数字示波器采集到放电电阻  $R$  上电压  $U(t)$ , 则可得 PVDF 压电传感器在爆炸瞬态过程中释放的总电荷量为

$$Q = \int_0^t I(t)dt = \int_0^t U(t)/Rdt \quad (4)$$

PVDF 压电传感器所测定的瞬态应力  $\sigma$  为

$$\sigma = K \cdot Q/A \quad (5)$$

式中,  $K$  为 PVDF 压电传感器的动态灵敏度系;  $A$  为 PVDF 压电传感器的工作面积.

### 3.2.3.3 PVDF 压电传感器测试方法的应用和发展

PVDF 压电传感器相比锰铜传感器测压上限较低, 锰铜传感器压力测试上限值可达 100 GPa, 主要用于测试冲击波产生的超高压, 但它的响应时间较慢, 难以真实地记录下猛炸药、脉冲激光

加载时的瞬态应力波形. PVDF 压电传感器具有响应快、灵敏度高、测压范围宽, 结构合理等特点, 可以直接埋入材料内部测量爆炸冲击波的超压峰值, 是一种理想的爆炸冲击波测压传感器. 李焰等<sup>[105]</sup> 通过自制的 PVDF 应力计, 对传爆序列长通道起爆传爆试验中的压力波形进行了测量, 对测量结果进行了定性分析. 蔡军锋等<sup>[106]</sup> 将 PVDF 计应用于炸药爆炸冲击波压力测量. 赵继波等<sup>[107]</sup> 为得到炸药水中爆炸冲击波在一定近场范围内的压力剖面曲线和峰值压力随传播距离的衰减规律, 采用在炸药起爆轴线上布置 4 个 PVDF 计测量冲击波压力的方法, 研究了 PVDF 计测试近场压力的可行性. 结果表明, PVDF 计可以用于水中爆炸近场冲击波压力的测量, 在量程允许范围内, 能得到较准确的冲击波压力峰值.

PVDF 作为一种新型的动高压测量手段, 越来越受到人们的重视. 其制备以及标定方法也在不断的发展中. 杜晓松等<sup>[108]</sup> 对 PVDF 计的制备方法进行了较为详细的说明, 并提出了 PVDF 计在温度影响、高压上限, 频响特性等方面尚需解决的一些问题. 李焰等<sup>[109]</sup> 对国产 PVDF 压电薄膜的冲击加载及卸载响应进行了研究.

### 3.2.4 电导率测试方法

研究炸药起爆过程的电导率对了解炸药的爆轰反应机理和反应区结构具有重要作用. 电导率是一个非常重要的物理参数, 它不仅依赖于物质的状态 (如压力、温度等), 而且更直接依赖于介质的组分<sup>[110]</sup>. 一般高能炸药的爆轰产物都有非常明显的电导率<sup>[111]</sup>, 对于大多数高能炸药来说, 电导率一般在  $0.1 \sim 100 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ . 电导率可反映爆轰产物物理-化学转变过程中有价值的信息. 随着电导率测试技术的不断提高, 越来越多地被用于研究钝感炸药的化学反应区结构和化学反应过程.

#### 3.2.4.1 电导率测试方法发展历程

炸药爆轰过程中的电导率测试最先是在俄国发展起来的, 后来美国的洛斯阿拉莫斯国家实验室也进行了一些相关的研究. 1964 年, Jameson 等<sup>[112]</sup> 最早报道了测试爆轰产物电导率的方法, 他们采用同轴测试方法测试了 B 炸药和彭特利特炸药爆轰过程中的电阻, 通过测试外加一定电压时的电流, 计算阻抗系数, 从而得到电导率. 此后, 同轴测试方法得到了较为广泛的应用和发展. 2001 年, Anisichkin 和 Sergey 等<sup>[110-111]</sup> 设计了平面测

试方法, 电流线性系统更接近一维, 并联样品回路中振荡电感减小, 接触电阻的影响在测试区域受到抑制, 一定程度上限制了侧面卸载, 测试结构在爆轰过程中破坏程度减小, 降低了干扰信号, 提高了测试的精度. 平面测试方法也成为近年来爆轰产物电导率测试主要采用的一种方法.

### 3.2.4.2 电导率测试方法及原理

目前研究炸药爆轰产物电导率的测试方法主要有: 电接触技术、非接触电磁法、分离电极技术和波阵面上超高频辐射光谱反射法. 而应用最多的是电接触技术, 主要采用的测试装置有图 3 和图 4 所示的两种.

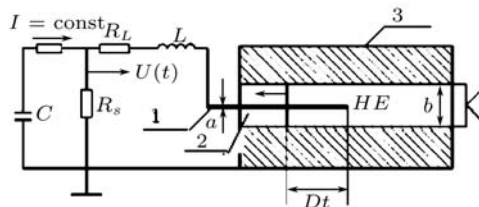


图 3 同轴测试方法装置示意图  
(1. 电极; 2. 炸药样品; 3. 铜套)

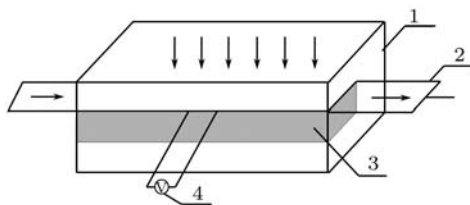


图 4 平面测试方法装置示意图  
(1. 绝缘盒; 2. 康铜箔; 3. 炸药样品; 4. 示波器)

在同轴测试方法中, 中心铜电极直接埋入放在共轴铜套内的铸装药柱中 (如图 3 所示), 铜套和电极分别和电路两端相连, 通过示波器记录爆轰过程中电阻  $R_s$  上的电压变化, 然后计算得出相应的电导率.

在平面测试方法 (如图 4 所示) 中, 铜镍电极置于待测炸药和绝缘板之间, 然后与恒流源相连. 炸药爆轰后, 电流经过爆轰产物, 通过示波器记录爆轰过程中电极两端的电压变化, 从而计算求得相应的电导率.

电导率测试方法以欧姆定律为基础, 通过测试高能炸药在爆轰过程中的动态电压变化, 根据

积分数值计算, 间接得到爆轰产物的电导率. 在同轴测试方法中, 分流电阻  $R_s$  两端的记录电压  $U(t)$  受到连线上的附加电阻  $R_L$  和电感  $L$  的影响, 最终电导率可用以下公式<sup>[147]</sup>表示

$$\sigma(x) = \frac{\ln(b/a) f(x)}{2\pi D} \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{R(t)} \right) \quad (6)$$

式中,  $a$  为电极直径,  $b$  为药柱直径,  $D$  为爆速,  $x = Dt$  (单位: cm),  $f(x)$  为修正方程,  $R(t)$  为元件的电阻.

$$R(t) = \frac{R_s U(t) + L dU/dt}{U(t) - U(0)} - R_L \quad (7)$$

式中,  $R_s$  为分流电阻,  $R_L$  为附加电阻,  $L$  为电感,  $U(t)$  为爆轰过程电极两端的电压,  $U(0)$  为电极两端的初始电压.

电导率的积分式为

$$Y = \int_0^{Dt} \sigma dx \quad (8)$$

由于同轴测试方法影响因素较多, 如电流分布的边缘效应, 爆轰波对测试电路的机械损害以及侧面卸载导致压力下降等, 使同轴方法测试电导率的精度不高, 在近些年的研究中运用较少. 而平面测试方法具有电流系统更接近于一维, 分流电路中附加自感应小, 测量区域接触阻抗效果被抑制, 爆轰波没有使测量回路变形等特点, 因此有较好的测量精度. 平面测试方法中爆轰产物的平均电导率可用如下公式<sup>[111]</sup>表示

$$\sigma = \frac{a_s}{a} \frac{\delta_s}{\rho_s (D - u)} \frac{1}{t} \left( \frac{U_0}{U} - 1 \right) \quad (9)$$

式中,  $a_s$  为分流电阻宽度,  $a$  为高能炸药宽度,  $\delta_s$  为分流电阻厚度,  $\rho_s$  为分流电阻阻抗,  $u$  为粒子速度,  $U$  为电极两端的电压,  $U_0$  为初始电压.

稳定的电导率可由下式获得

$$\sigma(t) = \frac{a_s}{a} \frac{\delta_s}{\rho_s (D - u)} \frac{U_0}{U^2} \frac{dU}{dt} \quad (10)$$

### 3.2.4.3 电导率测试技术的应用与发展

高能炸药爆轰过程中的电导率测试作为爆轰研究的一项重要测试技术得到了不断的发展和应用.

20 世纪 60 年代, Hayes<sup>[113]</sup> 设计了一种适用于液体炸药研究的特殊半球形探针, 通过对硝基甲烷、液态 TNT 等炸药进行实验, 发现最大电导率与爆轰产物中的自由碳含量之间具有密切的关系. 此后, Hayes<sup>[114]</sup> 在测试中引入了动力学装置, 用水浴加热方式对液态炸药持续加热, 通过压缩

空气把升温后的炸药压入测试容器中。对硝基甲烷、Comp. B 炸药和液态 TNT 进行实验发现,爆轰产物的电导率是时间的函数,与爆轰波阵面的宽度有关,不同炸药的电导率在时间上有很大差别,最大电导率在爆轰波阵面后出现的时间也不同。该方法打破了传统方法的限制,很大程度上提高了测试的时间精度,对均相炸药反应区的研究提供了帮助。但是,对于大多数固态高能炸药来说,加工成半球孔形的难度相当大,因此,半球形探针在后来的研究中很少被使用。1989年,Tasker等<sup>[115]</sup>比较系统地综述了凝聚炸药爆轰过程中的电导率测试方法,从在 PBX-9404 实验获得的电导率数据中发现,导电区是在爆轰波阵面后一个狭窄的区域。1993年,Tasker等<sup>[116]</sup>对 PBX-9501 炸药爆轰过程的电导率测试进行了一系列的研究,通过 Rogowski 线圈测量爆轰过程中的电流变化得到电导率。实验数据显示,存在约 100 ns 持续时间的电导率尖峰,紧随其后的是一个持续时间约为 1  $\mu$ s 的稳定状态。

随着电导率测试技术的不断完善,通过改进实验装置,优化测试电路,大大提高了电导率测试的时间精度(达到 10 ~ 20 ns)。Gilev 等<sup>[117]</sup>采用平面测试方法对多种单质炸药(TNT、特屈儿等)进行了测试,得到爆轰产物的最大电导率,该实验方法把测试精度提高了近一个数量级(达到 10 ns),远高于同轴实验方法的测试精度。另外,Sergey 和 Anatoliy<sup>[111]</sup>在对含金属的混合炸药的电导率实验中发现含铝炸药比非金属炸药的电导率大得多,开始时电导率很大,说明爆轰开始时 Al 成分含量高;然后电导率急剧下降,证明成分之间发生了化学反应,铝氧化后在产物颗粒表面形成绝缘层,从电导率曲线还可以得到 Al 在爆轰过程中的氧化时间。实验发现,电导率和炸药中铝粉含量密切相关。

国内在凝聚炸药爆轰产物电导率测试方面起步较晚,但也取得了一些进展。2005年,北京理工大学的周霖等<sup>[118]</sup>运用同轴测试方法对以 HMX 和 TNT 为主体的混合炸药爆轰产物的电导率进行了测量,研究了铝粉含量对爆轰产物导电性的影响。2007年,蒋治海等<sup>[119]</sup>建立了凝聚炸药起爆过程电导率的平面测试方法,运用该方法对 RHT-906 炸药和 TNT 炸药起爆过程的电导率进行了测量,结果表明,TNT 的最大电导率随起爆压力的减小而减小。2008年,唐恩凌等<sup>[120]</sup>测试了以 HMX 和 TNT 为主体的混合炸药爆轰产物的电导率。实

验结果表明添加铝粉炸药的电导率明显高于不含铝炸药。金兆鑫等<sup>[121]</sup>通过改进炸药爆轰产物电导率的同轴测试系统,测量了 TNT 铸装炸药中加入 RDX, Al, KCl 等药剂后爆轰产物的平均电导率。结果表明,TNT 中加入 RDX 后会减少其爆轰产物的电导率,而加入 Al 和 KCl 后则会增大其爆轰产物的电导率。2009年,焦清介等<sup>[122]</sup>利用冲击起爆方式改进了炸药爆轰过程电导率的同轴测试方法,进而测得铸装 TNT 炸药和 TNT/RDX 混合炸药爆轰过程中随时间变化的电导率曲线,通过分析曲线中拐点出现的原因,推导出了炸药的化学反应时间和反应区厚度。

#### 4 结论与展望

凝聚态炸药爆轰过程具有高速、高压、高温、瞬时性和破坏性等特征,与一般动态测试技术不同,凝聚态炸药爆轰测试技术需要快的动态响应频率,同时需要高抗干扰能力。现代电子学、光学技术的发展,大大促进了凝聚态炸药爆轰测试技术的发展,如瞬态光谱测试技术、VISAR/DISAR 测试技术、电导率测试技术、锰铜/PVDF 压力计测试技术和组合式电磁粒子速度计测试技术等,这些技术使研究人员能够获得凝聚态炸药的起爆、传爆和爆轰过程中多种物理量、化学量的变化过程,为研制武器装备、含能材料和爆破器材提供了有效的基础实验数据。

目前凝聚态炸药爆轰测试技术在宏观唯象测试方面已能够提供较多的基础特性试验数据。然而,对部分炸药爆轰性能参数(如爆温、爆压等)的精确测试,微型爆炸元件的爆轰过程测试,凝聚态炸药爆轰过程中微细观结构变化和化学变化过程的测试等,仍然是十分困难的问题。凝聚态炸药受冲击压缩的相变,炸药结构的破坏,爆轰产物的种类和爆轰产物出现的时间序列等,目前仍然以理论和数值模拟研究为主。结合爆轰研究的需求,作者认为凝聚态炸药爆轰测试技术的发展方向主要有以下几个方面:

(1) 加强凝聚态炸药爆轰微细观测试技术研究。光谱测试技术是能够获得凝聚态炸药爆轰过程中爆轰产物种类及出现的时间序列的可行方法,目前主要应用在炸药爆轰过程中相关温度的测试和气、固两相流爆轰反应时产物出现的时间序列测量<sup>[123]</sup>。现有瞬态光谱测试系统响应时间一般在 10 ~ 20 ns,尚无法满足研究凝聚态炸药爆轰时的

快速化学反应变化及多种产物组分测试需求。质子照相技术由于在穿透能力、材料精细结构识别、探测效率和空间分辨率等方面的优越性能<sup>[124]</sup>,充分展示了其作为下一代流体动力学实验主要诊断技术的潜能,可用于研究凝聚态炸药受冲击作用下的相变、损伤、内部缺陷的坍塌和热点形成过程等,有利于建立完整、准确的流体动力学模型。

(2) 拓宽现有测试技术应用领域。随着微、纳技术在炸药火工品中的应用,新型火工品元器件得到了快速的发展,新型火工品的研制也逐渐由过去的工程任务型转向对其作用过程的精细描述研究<sup>[125]</sup>。目前,相关测试技术尚不能满足这类应用需求。如微型火工品元器件的起爆、传爆到爆轰过程,由于尺寸小、起爆距离短,现有压力计、粒子速度计、高速相机等测试手段尚无法直接用于描述该类过程,需进一步改进。VISAR/DISAR测试技术在测试界面粒子速度/位移或炸药爆轰驱动较大尺寸飞片的速度/位移时,能够较好地实现精确测试,然而对于直径只有零点几毫米的飞片,尚无法准确获得,需在探头设计和抗干扰方面进一步开展工作。

(3) 炸药测试技术研究应与理论研究和数值模拟研究紧密结合。炸药爆轰试验测试往往需要花费大量的资金、人力和物力,利用理论研究和数值模拟研究的结果,通过精心的试验设计,可大大减少试验数量和过大的资金投入,达到事半功倍的效果。

## 参 考 文 献

- 1 张宝平,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学. 北京: 兵器工业出版社, 2001
- 2 花成,黄明,黄辉,等. RDX/HMX 炸药晶体内部缺陷表征与冲击波感度研究. 含能材料, 2010, 18(2): 152-157
- 3 赵科佳,刘明亮,郁月华,等. 宽带取样示波器上升时间与带宽的转换系数研究. 计量学报, 2006, 27(2): 160-163
- 4 Voitkiv A B, Najjari B, Ullrich J. Mechanism for electron transfer in fast Ion-Atomic collisions. *Physics Review Letters*, 2008, 101(22): 1-4
- 5 Barker L M, Hollenbach R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43: 4669-4675
- 6 McMillan C F, Goosman D R, Parker N L, et al. Velocimetry of fast surfaces using Fabry-Perot interferometry. *Review Scientific Instruments*, 1988, 59(1): 1-20
- 7 Crouzet B L, Bourianne R, Baudin G, et al. Ultra-fast optical pyrometer for the measurement of detonating explosive temperature. *The European Physical Journal Applied Physics*, 1999, 8(2): 189-194
- 8 Gilev S D, Trubachev A M. Detonation properties and electrical conductivity of explosive-metal additive mixtures. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2002, 138(2): 219-234
- 9 章冠人,陈大年. 凝聚炸药起爆动力学. 北京: 国防工业出版社, 1991
- 10 李银成. 非均质炸药冲击起爆和起爆后的行为. 高压物理学报, 2006, 20(1): 102-108
- 11 杨涛,夏智勋,雷必文. 发射药在强约束条件下的 DDT 特性. 推进技术, 1995, 6: 66-73
- 12 Olsem E M, Rosenberg J T, Kawamoto J D, et al. XDT investigations by computational simulations of mechanical response using a new viscous internal damage model. In: Proceedings of 11th Symposium on Detonation. Snow mall village, Colorado, 1998. 170-178
- 13 Urizar M J, Peterson S W, Smith L C. Detonation sensitivity tests. Los Alamos Scientific Laboratory Report, LA-7193-MS, 1978
- 14 Liddiard T P. The initiation of burning in high explosives by shock waves. In: Proceedings of 4th Symposium on Detonation. Silver Spring, Maryland, 1965. 487-495
- 15 Gittings E F. Initiation of a solid high explosive by a short-duration shock. In: Proceedings of 4th Symposium on Detonation. Silver Spring, Maryland, 1965. 373-380
- 16 董海山,周芬芬. 高能炸药及相关物性能. 北京: 科学出版社, 1989
- 17 Campbell A W, Davis W C, Travis J R. Shock initiation of detonation in liquid explosives. *Physics of Fluids*, 1961, 4(4): 498
- 18 Bernecker R R, Sandusky H W, Clairmont A R, et al. Deflagration to detonation transition studies of porous explosive charges in plastic tubes. In: Proceedings of 7th Symposium on Detonation. Annapolis, Maryland, 1981. 119-142
- 19 Bernecker R R, Price D. Burning to detonation transition in porous beds of a high-energy propellant. *Combustion and Flame*, 1982, 48: 219-231
- 20 Green L G, James E, Lee E L, et al. Delayed detonation in propellants from low velocity impact. In: Proceedings of 7th Symposium on Detonation. Annapolis, Maryland, 1981. 256-264
- 21 柯加山,陈朗,冯长根. 低冲击条件下凝聚炸药延迟起爆现象的研究进展. 火炸药学报, 2002, 20: 35-38
- 22 Jameson R L, Hawkins A. Shock velocity measurements in inert monitors placed on several explosives. In: Proceedings of 5th Symposium on Detonation. Pasadena, California, 1970. 23-30
- 23 Rigdon J K, Akst I B. An analysis of the "aquarium technique" as a pressure detonation pressure measurement gauge. In: Proceedings of 5th Symposium on Detonation. Pasadena, California, 1970. 48-54
- 24 Gustavsen R L, Sheffield S A, Alcon R R, et al. Embedded electromagnetic gauge measurements and modeling of shock initiation in the TATB based explosives LX-17 and PBX 9502. Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. In: Shock Compression of Condensed Matter-2001. American Institute of Physics (AIP). 2000. 1019-1022
- 25 Fuller P J A, Price J H. Electrical conductivity of manganin and iron at high pressures. *Nature*, 1962, 193(1): 262-263
- 26 阎军,徐更光,于长青. 光纤光谱技术在炸药爆温测量中的应用. 北京理工大学学报, 2000, 20(4): 492-495
- 27 Schmidt S C, Moore D S, Shaner J W. Raman spectroscopies in shock-compressed materials. In: Asay J R, Graham R A, Straub G K. eds. Shock Waves in Condensed Matter-1983. North-Holland: University of Michigan, 1984. 293-302
- 28 Bloomquist P D. Thermocouple temperature measurements in shock initiated PBX-9404. In: Proceedings of 7th

- Symposium on Detonation. Annapolis, Maryland, 1982. 1004-1009
- 29 蒋小华. 有氧化剂含铝炸药爆轰特征研究: [硕士论文]. 北京: 北京理工大学, 2003
- 30 Tasker D G, Granholm R H, Lee R J. The fast measurement of electrical conductivity structure within the detonation zone of condensed explosive. In: Schmidt S C, Holmes N C. eds. *Shock Waves in Condensed Matter*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1987. 561-564
- 31 王翔. 高能炸药爆温及反应区结构研究: [硕士论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005
- 32 Bdzil J B, Stewart D S. Modeling two-dimensional detonation with detonation shock dynamics. *Physics Fluids A*, 1989, 1(7): 1261-1267
- 33 柏劲松, 李平, 钟敏, 等. 以 DSD 理论和 LS 方法为基础的程序燃烧法. *爆炸与冲击*, 2008, 28(5): 402-406
- 34 吴艳红. 非均质凝聚态炸药冲击波临界起爆现象研究: [博士论文]. 长沙: 湖南大学, 2006
- 35 黄毅民, 鲁斌, 韩勇. TATB 基 PBX 炸药拐角实验与数值模拟. 见: 第八届全国爆炸力学学术会议文集, 井冈山, 2007
- 36 Bdzil J B, Stewart D S. Detonation shock dynamics: the onion-skin geometry. In: Los Alamos Internal Report, M-9-QR-86-3, 1986
- 37 卢校军, 王蓉, 黄毅民, 等. 两种含铝炸药做功能力与 JWL 状态方程研究. *含能材料*, 2005, 13(3): 144-147
- 38 陈朗, 龙新平, 冯长根, 等. 含铝炸药爆轰. 北京: 国防工业出版社, 2004
- 39 Smith L C. On brisance and plate-denting test for the estimation of detonation pressure. *Explosivstoffe*, 1967, 5: 106-110
- 40 Yeh Y, Cummins H Z. Localized fluid flow measurements with an He-Ne laser spectrometer. *Applied Physics Letters*, 1964, 4(10): 176-178
- 41 Munson D E, Barker L M. Dynamically determined pressure-volume relationships for aluminum, copper and lead. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(4): 1652-1660
- 42 Oswald R B, Mclean D R, Schallhorn D R, et al. One-Dimensional thermoelastic response of solids to pulsed energy deposition. *Journal of Applied Physics*, 1971, 42(8): 3463-3474
- 43 Goosman D R. Analysis of the laser velocity interferometer. *Journal of Applied Physics*, 1975, 46(8): 3516-3524
- 44 Hemsing W F. Velocity interferometer (VISAR) modification. *Review Scientific Instruments*, 1979, 50(1): 73-78
- 45 Levin L, Tzach D. Fiber optic velocity interferometer with very short coherence length light source. *Review Scientific Instruments*, 1996, 67(4): 1434-1437
- 46 Strand O T, Berzins L V, Goosman D R, et al. Velocity using heterodyne techniques. UCRL-CONF-206034, 2004
- 47 CAEP-IFP-DISAR-01 全光纤激光干涉测速仪. *爆炸与冲击*, 2009, 4: 443
- 48 龙新平. VLW 爆轰产物状态方程及纳米基铝粉含铝炸药爆轰特性研究: [博士论文]. 北京: 北京理工大学, 1999
- 49 何碧, 蒋小华, 李泽仁, 等. 用双灵敏度 VISAR 测试爆炸箔起爆器的飞片速度. *爆炸与冲击*, 2005, 25(1): 31-34
- 50 李志鹏, 黄毅民, 龙新平, 等. 大板实验中 TATB 基炸药爆轰波的传爆特性. *火炸药学报*, 2007, 30(2): 26-29
- 51 彭其先, 马如超, 刘俊, 等. VISAR 测试技术研究炸药反应区厚度. *流体力学实验与测量*, 2003, 17(1): 43-45
- 52 Weng J D, Tan H, Wang X, et al. Optical-fiber interferometer for velocity measurements with Pico second resolution. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(11101): 1-3
- 53 王德田, 李泽仁, 吴建荣, 等. 光纤位移干涉仪在爆轰加载飞片速度测量中的应用. *爆炸与冲击*, 2009, 29(1): 105-108
- 54 Gibson F C, Bowser M L, Summers C R. Use of an electro-optical method to determine detonation temperature in high explosives. *Journal of Applied Physics*, 1958, 29(4): 628-632
- 55 He X C, Han C B, Kang S F. The measurement of detonation temperature of condensed explosives with Two Colour-Optical Fiber Pyrometer. In: *Proceedings of 8th Symposium on Detonation*. Albuquerque, New Mexico, 1985. 567-574
- 56 Kato Y, Tanaka K, Sakurai T. Detonation temperature of nitromethane and some solid high explosives. In: *Proceedings of 8th Symposium on Detonation*. Albuquerque, New Mexico, 1985. 558-565
- 57 李佳, 庞其昌, 任克惠, 等. 瞬时光谱爆温测量系统. *光子学报*, 2000, 29(10): 937-941
- 58 白永林, 任克惠. 炸药爆轰温度的瞬时光谱测量. *光子学报*, 2003, 32(7): 868-871
- 59 郭学永, 李秀丽, 张黎明, 等. 非理想炸药爆炸产物温度的光谱法测试. *南京理工大学学报*, 2007, 31(5): 547-650
- 60 孙承纬, 卫玉章, 周之奎. *应用爆轰物理*. 北京: 国防工业出版社, 2000
- 61 Persson P A, Andersson B. A technique for detailed time-resolved radiation measurements in the reaction zone. In: *Proceedings of 4th Symposium on Detonation*. Silver Spring, Maryland, 1962. 602-608
- 62 Voskoboinikov I M, Gogulya M F. Radiation of the shock front in a liquid near the interface with a detonating charge. *Khimicheskaya Fizika (Russian Journal of Chemical Physics)*, 1984, 3: 7
- 63 Lubyatinsky S N, Loboiko B G. Detonation reaction zones of solid explosives. In: *Proceedings of 11th Symposium on Detonation*. Snow Mall Village, Colorado, 1998. 836-844
- 64 赵同虎, 张新彦, 李斌. 用光电法研究钝感炸药 JB-9014 反应区结构. *高压物理学报*, 2002, 16(2): 111-118
- 65 韩勇, 黄辉, 黄毅民, 等. 含铝炸药圆筒试验与数值模拟. *火炸药学报*, 2009, 32(4): 14-17
- 66 汤铁钢, 谷岩, 李庆忠, 等. 爆轰加载下金属柱壳膨胀破裂过程研究. *爆炸与冲击*, 2003, 23(6): 529-533
- 67 龙新平, 韩勇, 蒋治海, 等. 炸药爆轰驱动水初期过程的试验及数值模拟. *爆炸与冲击*, 2010, 30(1): 12-16
- 68 王福华. 纹影技术在侧向后喷流实验中的应用. *南京理工大学学报*, 2005, 29(3): 334-336
- 69 Thomas G O, Jones A. Some observations of the jet initiation of detonation. *Combustion and Flame*, 2000, 120(3): 392-398
- 70 胡栋, 韩肇元, 张寿齐, 等. 炸药爆炸变形和首次破碎的研究. *高压物理学报*, 2004, 3: 198-202
- 71 畅里华, 谭显祥, 汪伟, 等. 纹影技术用于爆轰与冲击波物理实验研究. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(12): 58-61
- 72 Ferm E N, Morris C L, Quintana J P, et al. Proton radiography examination of unburned regions in PBX-9502 corner turning experiment. Furnish M D, Thadhani N N, Horie Y. *Shock Compression of Condensed Matter-2001*, American Institute of Physics (AIP). 2001. 966-969
- 73 Smilowitz L, Henson I B F, Romero J, et al. Proton radiography of a thermal explosion in PBX9501. In: Elert M, Furnish M D, Chau R, et al. eds. *Shock Compression of Condensed Matter-2007*, American Institute of Physics (AIP). 2007. 968-972
- 74 郭学永, 惠君明, 谢立峰. 燃料爆炸抛撒过程的实验研究. *高压物理学报*, 2005, 19(2): 120-126
- 75 代晓淦, 向永. 两种塑料粘结炸药的 Steven 试验及撞击感度研究. *含能材料*, 2006, 14(1): 38-41
- 76 马燮圻, 计忠瑛, 王正荣, 等. 高速实时全息干涉摄影在固体火箭推进剂燃烧研究中的应用. *兵工学报*, 1986, 4: 58-62
- 77 刘常龄, 袁永华. 高速微粒子场的全息诊断技术. *高速摄影与光子学*, 1989, 18(1): 42-45



- 78 龚敏, 王德胜, 黎剑华. 全息干涉法在条形药包离面位移场研究中的应用. *爆炸与冲击*, 2005, 25(3): 227-231
- 79 Zaitzev V M, Pokhil P F, Shvedov K K. Electromagnetic method for measurement of explosion product velocity. *Doklady Akademii Nauk(DAN) SSSR*, 1960, 132(6): 1339-1340
- 80 Sheffield S A, Gustavsen R L, Alcon R R. In-situ magnetic gauging technique used at LANL-method and shock information obtained. In: Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. eds. *Shock Compression of Condensed Matter-1999*. American Institute of Physics (AIP). 2000. 1043-1048
- 81 张振宇, 王志兵, 卢芳云, 等. JO-9159 炸药的初始密度对爆轰波反应区宽度影响的实验研究. *高压物理学报*, 1999, 13(4): 268-271
- 82 李志鹏, 龙新平, 黄毅民, 等. 用组合式电磁粒子速度计研究 JOB-9003 炸药的冲击起爆过程. *爆炸与冲击*, 2006, 26(3): 269-272
- 83 王圣平, 陈丕琪. U 形电磁速度计测量爆轰参数时影响结果的两个因素. *爆炸与冲击*, 1983, 1: 76
- 84 Erickson L M, Johnson C B, Parker N L, et al. The electromagnetic velocity gauge: use of multiple gauges, time response, and flow perturbations. In: *Proceedings of 7th Symposium on Detonation*. Naval Surface Warfare Center Report NSWC MP 82-334, 1982. 1062
- 85 Cau J F. Inappropriate use of inclined electromagnetic velocity gauges in explosive. In: *Proceedings of 10th Symposium on Detonation*. Office of Naval Research Report ONR 33395-12, 1993. 224
- 86 Jacobs S J, Edwards D J. Experimental study of the electromagnetic velocity gauge technique. In: *Proceedings of 5th Symposium on Detonation*. Office of Naval Research Report No. ACR- 184, 1989. 413
- 87 Vorthman J E, Andrews G, Wackerle J. Reaction rates from electromagnetic gauge data. In: *Proceedings of 8th Symposium on Detonation*. Office of Naval Research, Report NSWC MP-86-194, 1986. 99
- 88 Sheffield S A, Gustavsen R L, Alcon R R. In-situ magnetic gauging technique used at LANL-method and shock information obtained. In: Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. eds. *Shock Compression of Condensed Matter-1999*. American Institute of Physics (AIP), 2000. 1043-1048
- 89 Leiper G A, Kirby I J, Hackett A. Determination of reaction rates in intermolecular explosives using the electromagnetic particle velocity gauges. In: *Proceedings of 8th Symposium on Detonation*. Office of Naval Research, Report NSWC MP-86-194, 1986. 187
- 90 Gustavsen R L, Sheffield S A, Alcon R R, et al. Initiation of EDC-37 measured with embedded electromagnetic particle velocity gauges. In: Furnish M D, Chhabildas L C, Hixson R S. eds. *Shock Compression of Condensed Matter-1999*. American Institute of Physics (AIP). 2000. 879-882
- 91 Lisell E. On Trycket Inflytande pa Elektriska Ledningsmotstander hos Metatter Samt En ny Metod Att Mata Hoga Tryck. Swedish, Uppsala Universitets Arsskrift, 1903. 1
- 92 Urtiew P A, Cook TM, Maienschein J L, et al. Shock sensitivity of IHE at elevated temperature. Paper Summaries of the Tenth International Detonation Symposium. Boston, MA, 1993. 139
- 93 池家春. 锰铜压阻传感器在爆轰序列研究中的应用. *火工品*, 1989, 1: 281-287
- 94 梁增友, 黄风雷, 段卓平, 等. PBX 炸药及其模拟材料冲击损伤的试验研究. *弹箭与制导学报*, 2008, 28(1): 131-134
- 95 路光明, 杜志明, 段卓平, 等. 用锰铜压阻法测量雷管内部爆压. *火工品*, 2000, 3: 6-8
- 96 严楠, 韩秀凤, 蔡瑞娇. 锰铜压阻法测量雷管输出的压力波形分析. *含能材料*, 2004, 12(5): 257-263
- 97 韩秀凤, 武玉红. 小尺寸非电火工元件锰铜压阻法测试技术研究. *火工品*, 2008, 5: 34-36
- 98 徐新春, 焦清介, 曹雄. 小尺寸装药爆轰在有机玻璃隔板中的衰减规律. *含能材料*, 2009, 17(4): 431-435
- 99 杜晓松, 杨邦朝, 王卉. 薄膜式锰铜传感器——一种新型的超高压传感器. *仪表技术与传感器*, 2000, 1: 4-6
- 100 段卓平, 关智勇, 黄正平. 箔式高阻值低阻锰铜压阻元件的设计及动态标定. *爆炸与冲击*, 2002, 22(2): 169-172
- 101 Kawai H. The piezoelectricity of poly vinylidene fluoride. *Journal of Applied Physics*, 1969, 8(7): 975-976
- 102 Bauer F. Method and device for polarizing ferroelectric materials. US Patent, Patent Number: 4, 611, 260, Date of Patent: Sep.9, 1986
- 103 Lee L M, Johnson D E, Bauer F, et al. Piezoelectric polymer PVDF application under soft X-ray induced shock loading. In: Schmidt S C, Dick R D, Forbes J W. eds. *Shock Compression of Condensed Matter-1991*. Amsterdam: North-Holland publisher, 1991. 879-882
- 104 Reed R P, Graham R A, Moore L M, et al. The Sandia standard for PVDF shock sensors. In: Schmidt S C, Davison L W. eds. *Shock Compression of Condensed Matter-1989*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1990. 825-828
- 105 李焰, 王凯民, 谭红梅. PVDF 应力计在起爆试验研究中的应用. *火工品*, 2003, 3: 6-10
- 106 蔡军锋, 易建政, 檀朝彬. PVDF 压电传感器在爆炸冲击波测量中的应用. *研究与开发*, 2005, 3: 13-15
- 107 赵继波, 谭多望, 张远平, 等. PVDF 计在水中爆炸近场压力测试中的应用. *火炸药学报*, 2009, 32(3): 1-4
- 108 杜晓松, 杨邦朝, 周鸿仁. PVDF 冲击压力传感器的制备和应用. *功能材料*, 2002, 33(1): 15-18
- 109 李焰, 张向荣, 谭红梅. 国产 PVDF 压电薄膜的冲击加载及卸载响应研究. *高压物理学报*, 20004, 18(3), 261-266
- 110 Anisichkin V F, Gliiev S D, Ershov A P, et al. Reaction zone in detonations of dense explosives. In: *Proceedings of 12th Symposium on Detonation*. 2002. 237-246
- 111 Sergey D G, Anatoliy M T. Study of physical-chemical transformations in detonation wave by the electric conductivity method. In: *Proceedings of 12th Symposium on Detonation*. 2002. 6-17
- 112 Jameson R L, Lukasik S J, Pernick B J. Electrical resistivity measurements in detonating composition B and Pentolite. *Journal of Applied Physics*, 1964, 35(3): 714-720
- 113 Hayes B. On the electrical conductivity in detonation products. In: *Proceedings of 4th Symposium on Detonation*. Office of Naval Research, ACR-126: Washington, 1967. 595-601
- 114 Hayes B. Electrical measurement in reaction zones of high explosives. In: *Tenth Symposium (International) on Combustion*, the Combustion Institute, 1965. 869-874
- 115 Tasker D G, Lee R J. The measurement of electrical conductivity in detonating condensed explosives. In: *Proceedings of 9th Symposium on Detonation*. 1989. 396-406
- 116 Tasker D G, Lee R J, Gustavson P K. Measurement of electrical conductivity in detonating condensed explosives. NSWCD/TR-92/218, NITS No: AD-A264 482/1/HDM
- 117 Gilev S D. The development of a method of measuring a condensed matter electro-conductivity for investigation of dielectric-metal transitions in a shock wave. *Journal of Physics. IV(FRANCE)*, 1997, 7: C3-211-216

- 118 周霖, 廖英强, 徐更光. 爆轰产物导电性的实验测量. 含能材料. 2005, 13(3): 148-150
- 119 蒋治海, 龙新平, 何碧, 等. TNT 和 RHT-906 炸药起爆过程的电导率研究. 含能材料, 2007, 15(2): 169-171
- 120 唐恩凌, 廖英强. 凝聚炸药爆轰产物的电导率测量. 弹箭与制导学报, 2008, 28(6): 126-128
- 121 金兆鑫, 焦清介, 陈曦. 含 TNT 注装混合炸药爆轰产物电导率实验研究. 含能材料, 2008, 16(4): 420-423
- 122 焦清介, 金兆鑫, 徐新春. 铸装 TNT/RDX 爆轰过程导电性及反应区厚度实验. 含能材料, 2009, 17(2): 178-182
- 123 胡栋, 孙珠妹. 利用单色谱仪研究炸药粉快速反应产物发射谱. 光学学报, 1996, 16(4): 426-429
- 124 许海波, 孔令海, 彭现科. 高能质子照相的研究进展. 物理, 2008, 37(11): 783-787
- 125 王晓丽, 焦清介. 微/纳米含能薄膜材料的制备与应用研究. 含能材料, 2006, 14(2): 139-141

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1774.O3.20120316.1539.003.html>

## REVIEW ON THE TEST METHODS OF CONDENSED EXPLOSIVE DETONATION\*

LONG Xingping<sup>1,†</sup>    JIANG Zhihai<sup>2</sup>    LI Zhipeng<sup>2</sup>    WEI Xianfeng<sup>3</sup>    HAN Yong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> China Academy of Engineering Physics (CAEP), Mianyang 621900, China

<sup>2</sup> China Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics (CAEP), Mianyang 621900, China

<sup>3</sup> School of Mechanic-Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

**Abstract** Detonation physics is an experimental branch of sciences which is propelled by the development of test methods. In this paper, recent studies of condensed explosive detonation performance were elaborated, and the test techniques of condensed explosive and its application were both systematically presented from optical and electrical aspects. With detailed descriptions and analysis of the progress of test methods, development directions of the measurement and test technique are suggested.

**Keywords** explosion mechanics, solid explosive, testing method



龙新平, 男, 50 岁, 博士生导师, 中国工程物理研究院研究员, 长期从事材料动态断裂、爆炸力学、炸药性能和火工品等领域的研究工作. 负责、合作完成科研课题 20 多项, 公开发表论文 30 余篇, 获得部级科技进步奖二等奖 2 项, 三等奖 2 项, 部级基金二等奖 3 项, 获国防专利 1 项. 多项科研成果成功用于国防科研和民用技术, 取得了良好的社会效益和经济效益. 荣获“中国科协求是杰出青年实用工程奖”、“全国十大杰出青年”等多项奖励和荣誉称号. 2004 年入选首批“新世纪百千万人才工程”国家级人选.

\* The project was supported by the NSAF Foundation of China (10676120) and the Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (2008A0101003).

† E-mail: longxinping@vip.sina.com