

文章编号 1004-924X(2023)19-2789-10

## 爆炸激波管出口流场特征的纹影诊断与分析

张 军, 黄含军, 毛勇建\*, 黄海莹, 郑 星, 杨 茂  
(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 冲击波是爆炸毁伤的主要载荷形式之一, 炸药驱动激波管是较真实复现高超压冲击波场景的可能方式, 当前亟需关注冲击波与产物分离状态、波阵面形态等实验参数测试问题, 仅依靠传统电测原理的单一点源压力测量无法满足上述流场表征需要。基于反射式纹影原理并利用激光光源和系列光学元件, 搭建了一套激波管出口流场诊断系统, 将流动现象的可视化观测结果与传统压力测量相结合, 完善流场特征诊断与分析方法。研究表明, 该纹影系统能够清晰获得激波管出口的冲击波和产物运动流场图像, 通过与压力测试与激波管点火时序的同步控制, 可有效揭示压电式冲击波压力传感器数据振荡、压力突变、漂移等特征, 以及爆炸后管道中应力波引起的管口及空气振动等现象。基于图像分析可分析获得炸药爆炸激波管出口冲击波运动速度和压力的空间衰减特性, 该结果为更好理解炸药驱动激波管冲击波压力的形成和演化规律研究提供了诊断途径和分析基础。

**关键词:** 光学测量; 激波管; 爆炸流场; 纹影法; 冲击波

**中图分类号:** O382 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20233119.2789

## Schlieren diagnosis and characteristic analysis of outlet flow field for blasting shock tube

ZHANG Jun, HUANG Hanjun, MAO Yongjian\*, HUANG Haiying, ZHENG Xing, YANG Mao

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

\* Corresponding author, E-mail: maoyj@caep.cn

**Abstract:** Shock waves represent a primary form of damage from explosions, and explosive-driven shock tubes can simulate high overpressure shock wave scenarios. It is essential to determine test parameters, including the separation among the shock wave, explosion products, wave-front shape. Traditional pressure measurements, grounded in electrical principles, are insufficient for current flow field characterization research. Leveraging the reflection schlieren principle, a diagnostic system is developed for the shock tube nozzle's flow field. This system utilizes a laser source and sequence of optical elements. By integrating visual observations of flow phenomena with conventional pressure data, the method for analyzing flow field characteristics is enhanced. The findings indicate that the schlieren system captures high-resolution images of the shock wave and product flow field at the exit of the shock tube. Synchronized schlieren images, aligned with the pressure tests of the shock tube and ignition timings, offer insights into data oscillation, pressure anomalies, and the drift observed in piezoelectric pressure sensors. They also highlight the vibration effects in the nozzle and surrounding air, resulting from stress waves post-explosion within the tube.

收稿日期: 2023-02-18; 修订日期: 2023-03-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12072334, No. 11602256)

Through image analysis, the spatial decay patterns of the velocity and pressure of the shock wave at the explosive outlet of the shock tube can be obtained. These results furnish a novel diagnostic technique and analytical foundation, enhancing our comprehension of the formation and evolution of shock wave pressure in the explosive-driven shock tube.

**Key words:** optical measurement; shock tube; explosion flow field; schlieren method; shock wave

## 1 引言

鉴于军事冲突中爆炸装置的大量使用以及爆炸灾害事故频发,爆炸冲击波造成的生命伤害和财产安全受到广泛关注。激波管可用于复现爆炸场景,进而更好地在实验室内开展爆炸冲击波毁伤效应研究。高能炸药驱动式激波管是当前获得高达数十兆帕超高压冲击波、满足较真实的爆炸动压/静压比的重要途径<sup>[1-3]</sup>。在该类激波管设计中,关键难题在于如何在实验段内得到与爆炸产物分离、且波阵面平整的冲击波,并有效构建冲击波载荷参数与管道结构、起爆炸药参数之间的关联预示关系<sup>[4]</sup>。

爆炸流场的特征测量是数值模型验证、确认试验成功与否的重要基础。传统接触式电测法能够得到爆炸流场中离散点的压力特征,却无法得到冲击波波阵面形态、与爆炸产物运动分离现象等的测量<sup>[5-6]</sup>。同时,传统压力测量方法需以爆炸流场形态的先验预判为基础,实验测量准确性还需结合最终的流场特征综合研判,如波阵面是否与传感器敏感面垂直或平行、是否存在爆炸高温漂移<sup>[7-8]</sup>、产物撞击耦合的附加干扰和振荡输出<sup>[9-10]</sup>等。对于炸药驱动激波管而言,爆炸多相流产物和冲击波具有高温、高压、高瞬态特征,同时存在冲击波反射、汇聚等复杂现象,因此为满足爆炸激波管的理论设计和试验验证需求,亟需在传统电测方法基础上进一步探寻新的测量途径。

阴影法、纹影法等非接触光学测试方法具有对流场干扰小、硬件布置简单易用等优点,广泛应用于流场形态的可视化观测。随着激光光源、计算机和数字图像等硬件技术的快速发展,该技术已逐渐实现流动介质运动速度、温度等参数的定量分析<sup>[11-14]</sup>。在冲击波观测与定量诊断应用方面,当前研究主要集中在炸药或弹丸自由空气场爆炸后的冲击波纹影图像分析上<sup>[15-16]</sup>。相比于自

由场,激波管内由于管道壁的约束,爆炸冲击波形成和波系结构的演化规律更加复杂,不过激波管内炸药爆炸流场的可视化观测与定量测量工作却鲜有报道。胡洋等<sup>[17]</sup>针对矿井瓦斯/空气预混气体爆燃流场问题,在燃气驱动激波管基础上设计了“Z”字形光路的高速激光纹影,并获得了出口的爆燃流场演化图像。该工作为炸药爆炸激波管出口流场诊断提供了较好的借鉴。但相比可燃气体等燃烧或爆燃反应,由于炸药爆炸反应时间更短(炸药反应 $\mu\text{s}$ 量级,发射药管内反应 $\text{ms}$ 量级、燃气燃烧或爆燃甚至在 $100\text{ ms}$ 量级以上<sup>[18]</sup>),其瞬态流场演化特征诊断还需充分考虑高速成像的响应灵敏度,并对爆炸伴随的火光、高量级结构波动等非冲击波响应进行有效的识别和处理。

本文通过高速数字化 CCD 相机并结合系列光学元件,在小型爆炸激波管装置的基础上,利用平行光纹影成像原理搭建了基于激光光源的高速、高灵敏度、远距离、与起爆系统和压力测试同步的纹影测量系统,从而实现管道出口流场特征的精密诊断,并对出口流体动力学现象进行了分析,为理解爆炸激波管中冲击波形成与演化规律提供图像依据。

## 2 原理

纹影法通过光线在非均匀介质中的偏折以及到达相机的光强变化来分析流场特征。

### 2.1 光的折射

光线在空气或其他气体中的折射率 $n$ 与介质密度 $\rho$ 满足 Gladstone-Dale 关系。具体表达式如下:

$$n=1+k\rho, \quad (1)$$

式中 $k$ 为可见光的 Gladstone-Dale 系数。

在三维空间中,当光线沿流场某方向传播(设为 $z$ 向)时,会在垂直于传播方向的投影平面

内(设为  $xy$  平面)发生偏折,其沿  $x, y$  方向的偏转角  $\epsilon_x, \epsilon_y$  的光学方程式分别为:

$$\epsilon_x = \int_0^z \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz, \quad (2)$$

$$\epsilon_y = \int_0^z \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial y} dz, \quad (3)$$

式中  $\frac{\partial n}{\partial x}, \frac{\partial n}{\partial y}$  分别为沿  $x, y$  方向的折射率梯度。

## 2.2 基本原理

在典型的纹影光路中(如图 1 所示),点光源通过透镜形成平行光,由透镜 2 焦点处的刀口控制进入成像屏幕的进光量。当观测路径上为均匀介质时,屏幕表现为均匀光强(设为  $I_0$ )的初始图像。初始光强与光源强度(设为  $I_s$ )、刀口处的初始成像面积相关,具体表达式为:

$$I_0 = k I_s \frac{wh}{f_2} = \text{常数}, \quad (4)$$

式中:  $k$  为光强在光源至成像屏幕传播路径中的衰减系数,  $f_2$  为透镜 2 的焦距,  $w, h$  分别为在  $xy$  平面的成像宽度和高度。

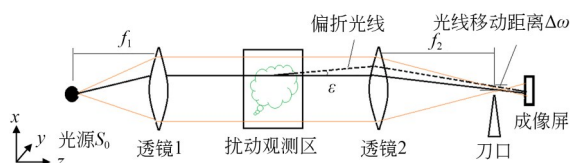


图 1 透射式纹影基本原理示意图

Fig. 1 Principle of transmission schlieren system

当冲击波等介质扰动导致光线偏折  $\epsilon_x, \epsilon_y$  角度后,光源的成像宽度和高度将变化  $\Delta w, \Delta h$ , 成像尺寸变化示意图见图 2。表达式分别为:

$$\Delta w = f_2 \tan \epsilon_x, \quad (5)$$

$$\Delta h = f_2 \tan \epsilon_y. \quad (6)$$

根据式(4),在成像屏幕上出现介质引起的光强相对变化  $\Delta I/I_0$  可表示为:

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \frac{wh - (w - \Delta w)(h - \Delta h)}{wh} = \frac{h\Delta w + w\Delta h - \Delta w\Delta h}{wh}. \quad (7)$$

忽略二阶小量的情况下,式(7)近似为:

$$\frac{\Delta I}{I_0} \approx \frac{\Delta w}{w} + \frac{\Delta h}{h} = \frac{f_2}{w} \tan \epsilon_x + \frac{f_2}{h} \tan \epsilon_y, \quad (8)$$

式中  $\frac{f_2}{w}, \frac{f_2}{h}$  也为纹影系统的灵敏度。当折射角度

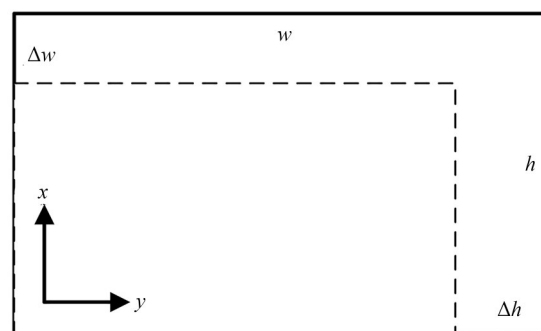


图 2 成像面积变化示意图

Fig. 2 Variation of imaging area

一定时,纹影系统的透镜焦距越大或者刀口的初始成像宽度越小,比值  $\frac{f_2}{w}, \frac{f_2}{h}$  越高,光强比(也称反差或衬度)也越大,对扰动观测区内的微小折射率变化反应就越强。

## 2.3 激波管流场参数特征与图像处理

相比空气,在炸药驱动激波管内产生的冲击波和爆炸产物具有不同的密度特征,这是纹影观测与分析的基础。图 3 给出了激波管组成示意图。

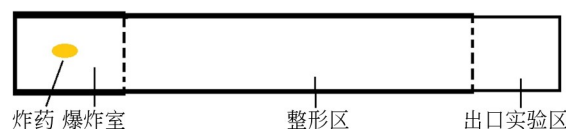


图 3 爆炸激波管组成示意图

Fig. 3 Sketch of blasting shock tube

理想状态的激波管出口流场载荷预期是与爆炸产物分离、波阵面相对平整、具有特定压力峰值和正压持续时间的理想冲击波,具体见图 4。一维假设下,平面冲击波的密度、压力和速度之间近似满足 Rankine-Hugoniot 关系<sup>[19]</sup>,即:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma + 1)(\frac{v_s}{v_0})^2}{(\gamma - 1)(\frac{v_s}{v_0})^2 + 2}, \quad (9)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 + \frac{2\gamma}{\gamma + 1} [(\frac{v_s}{v_0})^2 - 1], \quad (10)$$

式中:  $p_2, \rho_2$  为冲击波波阵面后的压力和密度;  $p_1, \rho_1$  为波阵面前的压力和密度;  $\gamma$  为管道初始气体的比热比,  $v_0$  为声速,  $v_s$  为激波运动速度。

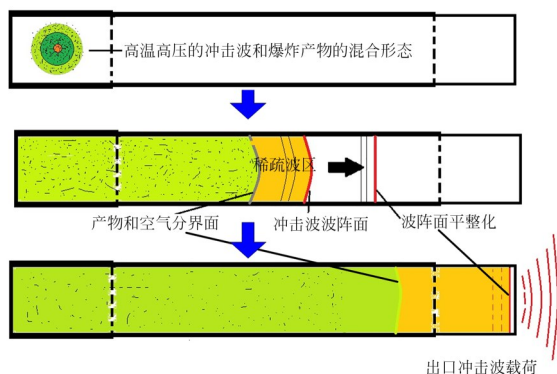


图 4 理想爆炸激波管流场演化状态示意图

Fig. 4 Ideal flow field evolution of blasting shock tube

激波管设计的关键在于利用整形段实现冲击波与产物分离以及波阵面的平整化。倘若管道和炸药参数的匹配设计不合理,如整形段过短,则出现产物和冲击波混合、波阵面非平面的状态,见图5。

在式(9)、式(10)的基础上,利用高幅频的数字摄影可在进行流场观测的同时,进一步分析冲击波的运动速度和压力等信息。图6给出了纹影图像数据的处理流程。

实验前,开展视场图像像素尺寸标定。其余图像处理和分析工作通过自编程序实现图像批处理计算,以提高分析计算效率。

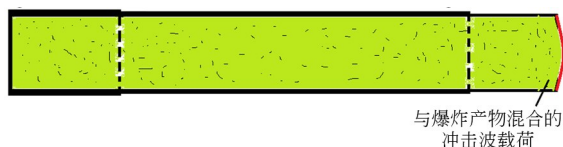


图 5 不合理设计爆炸激波管流场状态示意图

Fig. 5 Unreasonable flow field of blasting shock tube

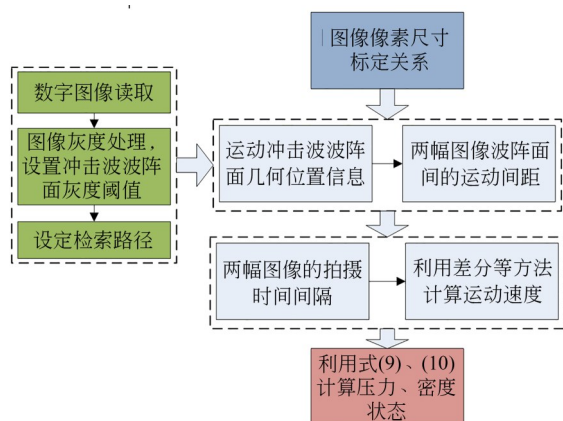


图 6 冲击波纹影图像处理流程图

Fig. 6 Processing steps of shock wave schlieren images

### 3 测量系统设计

高速纹影重点获得激波管出口流场图像信息(形态、运动速度等),压力传感器获得冲击波压力时间历程数据,两者同步测试以揭示流场载荷机制。

#### 3.1 高速纹影系统

考虑到炸药爆炸冲击波或小飞溅物可能对光学器件造成损伤,本文采用反射式光路布置测试系统,如图7所示。两个主反射球面镜相距约50 m,主反射球面镜焦距为5 m、直径为800 mm。系统采用波长520 nm的绿色激光作为光源,经过3 mm狭缝和球面镜产生的平行光通过监测区域后,最终聚焦于刀口并成像于高速数字式CCD相机。CCD相机的拍摄帧频为3万幅每秒,幅间间隔为33  $\mu$ s。

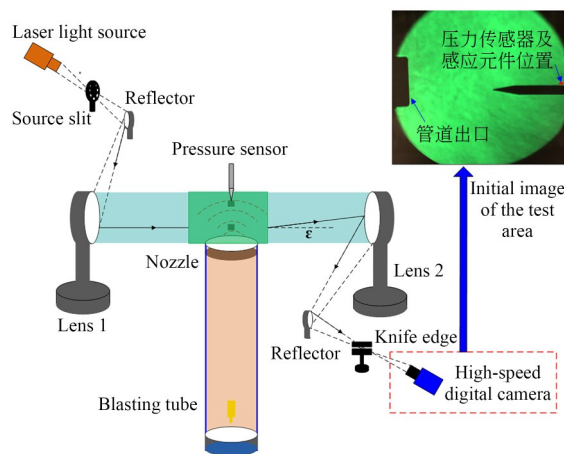


图 7 高速纹影测试系统布局光路与初始视场图像

Fig. 7 Layout of high-speed schlieren testing system and initial field image

#### 3.2 冲击波压力传感器测试系统

为对比纹影测量结果,在纹影成像视场范围内布置压电式接触冲击波压力传感器。其中,传感器的响应上升时间不大于2  $\mu$ s,测量量程为2 MPa,数据采集系统的采样率为1 Msa/s,AD分辨率为24 bit。

#### 3.3 激波管系统及同步控制模块

激波管为小型原理性样机。圆形管道的出口内径为87 mm、外径为105 mm。爆炸室离出口端面约4 m,实验由20 V稳压电源输出,引爆8#雷管和梯恩梯炸药,电源同步输出触发信号给CCD相



机和压力数采系统确保各测试系统延时同步,触发模块示意图见图 8。激波管出口和压力传感器在纹影测量系统中的初始视场图像见图 7。

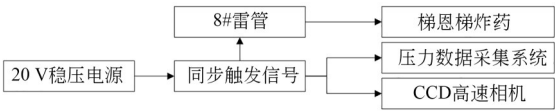


图 8 时间同步触发模块  
Fig. 8 Time synchronization trigger module

4 实验结果与分析

4.1 压力传感器测试结果

为验证上述实验测试系统的有效性,开展了 25 g 梯恩梯炸药爆炸实验。实验测得的压力传感器曲线如图 9 所示。由图 9 可知,由于激波管内炸药爆炸后出口介质流动的影响,压力传感器测试曲线表现出明显的几个阶段,分别用  $T_1\sim T_3$  表示,其中各阶段起始时刻用  $t_1,t_2,t_3$  表示。从  $t_2$  时刻开始,压力测试曲线出现明显的压力突变以及压力衰减,表现出典型的冲击波特征。但相比于经典的自由场运动激波压力时间衰减特征,如弗里德兰衰减方程<sup>[20]</sup>,本次实验中压力曲线呈现了多处振荡现象,包含压力突变前零线附近的微

弱振荡(图 9 中  $t_1$ )、压力衰减后期的大幅负压振荡(图 9 中  $t_3$ )等,各阶段振荡出现的大致时间如图 9 所示。

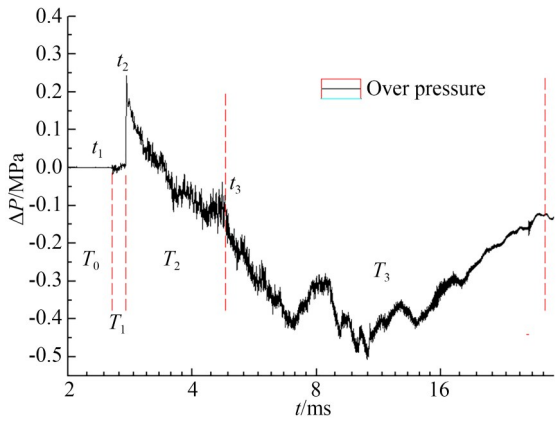


图 9 冲击波压力测试曲线  
Fig. 9 Curve of shock wave pressure

4.2 高速纹影图像测量结果

利用高速纹影对管口的流场形态进行测试,测得压力曲线上的  $t_1,t_2,t_3$  时刻对应的流场纹影图像如图 10 所示,具体时刻见表 1。由表 1 可知,高速纹影系统测得的时刻点和压力传感器的测试结果基本吻合,两者的误差主要由采样率不同

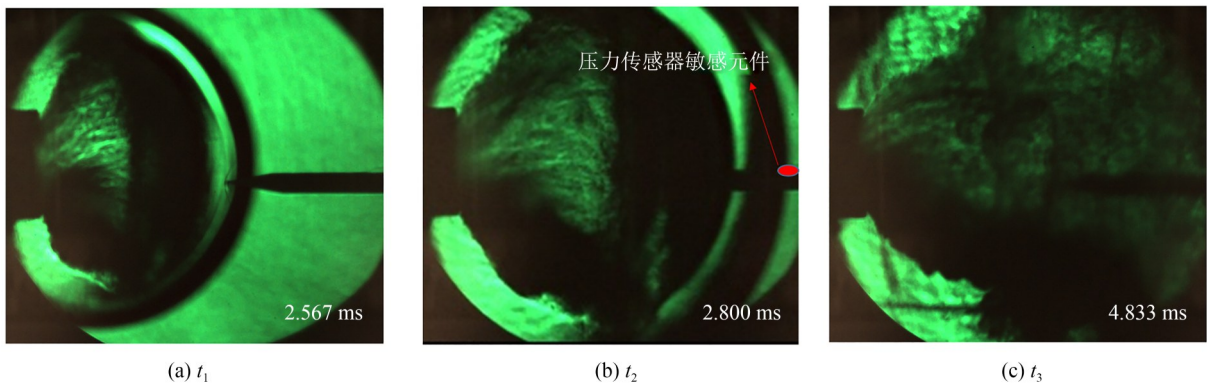


图 10 到达传感器时的流场介质纹影图像  
Fig. 10 Schlieren images of flow field medium arrival sensor

表 1 流动介质到达传感器时间  
Tab. 1 Time of flowing medium arrival sensor (ms)

测量方法	压力突变前的 微弱振荡起始时刻( $t_1$ )	压力突变时刻( $t_2$ )	压力衰减后期的 大幅振荡( $t_3$ )
高速纹影系统	2.567	2.800	4.833
冲击波压力传感器	2.554	2.762	4.815

引起,冲击波压力传感器测量系统的采样率为 1 Msa/s,时间精度为 1  $\mu$ s,而高速相机幅频为 30 000 frame/s,相邻两张图片之间的时间精度为 33  $\mu$ s。

由图 10 可知,压力突变的  $t_2$  时刻,纹影图像中有明显的暗色介质波阵面到达压力传感器的敏感元件。根据纹影测量原理以及式(9)、式

(10),并结合图 9 的压力曲线突变特征,外层的暗色椭球形波阵面即为激波管出口的冲击波。根据冲击波产生原理,冲击波波阵面属于高密度的空气介质,紧跟其后且有一定间隔的喷射状的流动介质属于高温爆炸产物。图 11 进一步给出了冲击波和爆炸产物从管口流出、波阵面长大、逐渐分离的演化过程图像。

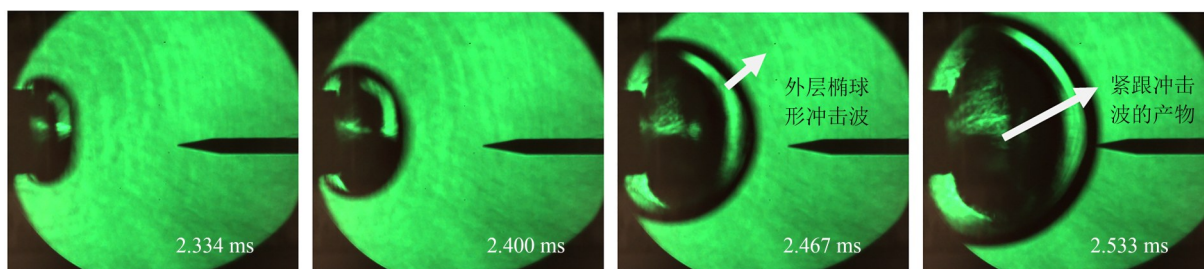


图 11 管口冲击波和产物的演化图像

Fig. 11 Evolution images of nozzle shock wave and product

结合图 10 和图 11 中的冲击波、产物及它们与传感器相互作用的演化图像来看,冲击波只有到达压力传感器的敏感元件时才引起突变响应,如图 10(b)所示;爆炸产物到达传感器尖端后便出现压力曲线的微弱振荡(见图 9 和图 10(a)),爆炸产物与传感器作用一定时间后压力曲线出现了大幅振荡(类似于零漂现象)。

本次实验中压力传感器为压电式传感器。国内外已有大量研究<sup>[7-10]</sup>表明,传统压电式压力传感器在炸药爆炸伴随的高温、高速运动产物及其颗粒等作用下,压电传感器会产生附加寄生响应,可能使冲击波测量数据存在零漂、数据振荡、毛刺等不同程度的干扰。利用高速纹影观测结果也较好地证实了该现象。

需要指出的是,在爆炸发生约 0.767 ms 时,冲击波和产物未到达出口前,高速纹影图像中已出现有规则的微弱平面波动条纹,约 1.367 ms 时出现了局部弧形波动条纹,如图 12 所示。平面波动条纹基本与管道端面平行,局部弧形波动以圆管轮廓上下角点为中心萌生,并随着传播发生相互干涉。

众所周知,激波管内炸药爆炸后,产生的高压气体产物一方面在管道中的空气介质内传播,另一方面将碰撞激波管壁、激起管中应力波,包

括轴向的纵波和径向的剪切波,并迅速向出口传播。按照波传播理论<sup>[21]</sup>,纵波传播速度比剪切波速度更快。纵波波速  $C$  和剪切波速  $C_T$  分别估算如下:

$$C = \sqrt{E/\rho}, \quad (11)$$

$$C_T = \sqrt{E/2\rho(1+\nu)}, \quad (12)$$

式中: $\rho$ ,  $E$  和  $\nu$  分别为材料的密度、弹性模量和泊松比。爆炸实验用圆管材料为炮钢,取文献[22]中类似材料实测的弹性模量(约 262.8 GPa),按此估算,激波管管道中纵波波速和剪切波速分别为 5 804 m/s 和 3 597 m/s。按爆炸点至管口端面的应力波传播路径估算,纵波和剪切波传播至管口端面的用时分别约为 0.705 ms 和 1.137 ms,该估算值与高速纹影图像中平面波动和局部弧形波动条纹出现的时刻(分别约为 0.767 ms, 1.367 ms)基本吻合。经测算,平面波动条纹沿轴线运动的平均速度约为 337 m/s,与声速接近。因此,可判断平面波动条纹是由爆炸后,管中纵波传递至管端、引起端面轴向振动响应,进而扰动附近空气形成声波所致;局部弧形波动条纹则应该与剪切波波传播、管口径向振动响应(膨胀/收缩等)响应有关。

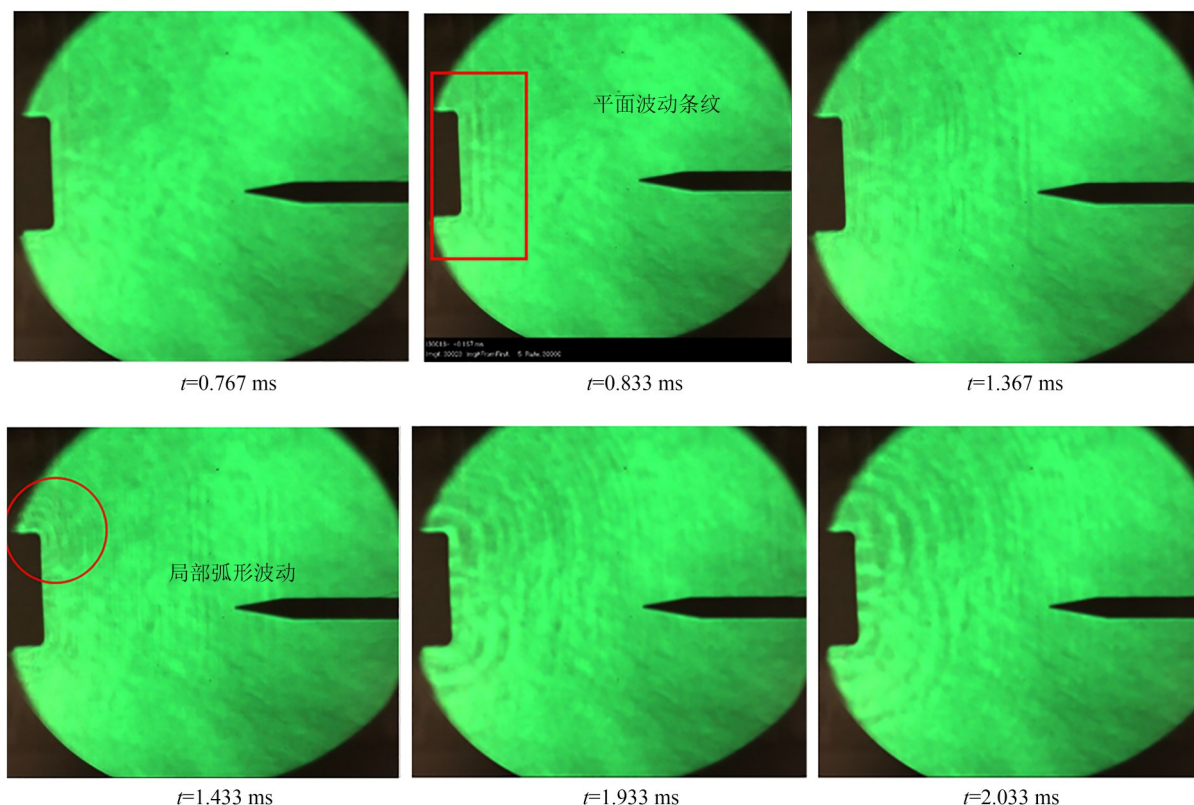


图 12 爆炸早期声波波动条纹纹影图像

Fig. 12 Schlieren images of acoustic wave stripes in early explosion stages

图 12 中显示的平面波动和弧形波动略微滞后于应力波到达端面响应时刻,其原因应该与爆炸延时(炸药反应在几十  $\mu\text{s}$ ),端面初期响应较弱,以及存在图像的人工判读误差有关。上述结果表明,该高速纹影系统具有较高灵敏度,不仅能够获得冲击波和产物的运动形态,还能有效捕捉管口瞬态结构引起的空气振动等现象。

#### 4.3 冲击波运动速度测量分析

出口冲击波分离后迅速传播,利用图 6 所示的图像处理流程,在视场图像像素尺寸标定的基础上,通过自编程序批处理图像,计算获得视场范围内冲击波沿着激波管轴向方向的运动速度。需要说明的是,由于图像处理时灰度阈值设置会带来冲击波波阵面位置识别误差并最终引入速度和压力的计算结果。本文考虑不同阈值时冲击波的运动速度及其统计误差棒,如图 13 所示。结果表明,由于激波管道整形约束,虽然出口距离爆炸点 4 m,但出口冲击波运动速度仍高达 1 000 m/s。在靠近管口端面较近的区域,通过图像处理获得的运动速度误差相对更大,这与管口

冲击波和爆炸产物未完全分离、不同图像阈值时冲击波边缘识别误差较大有关系。

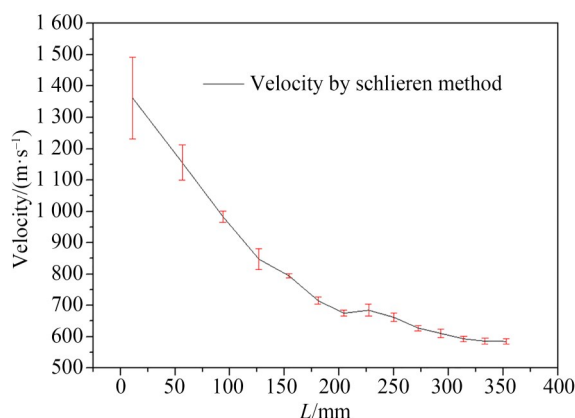


图 13 冲击波运动速度随传播距离的变化

Fig. 13 Variation of shock wave velocity with propagation distance

利用式(10)进一步计算冲击波压力超压峰值,基于纹影图像方法和压力传感器实测超压峰值结果对比如图 14 所示。冲击波和爆炸产物流



出管道后,由于膨胀作用,冲击波波阵面的运动速度和超压峰值随传播距离迅速衰减且随空间传播逐渐变缓。实验中相机的拍摄间隔为 33  $\mu\text{s}$ ,因此对速度和压力的空间分布表现出较高分辨率。从图 14 中可见,在距离管面 350 mm 处,基于图像法获得的冲击波超压峰值与压力传感器的实测数据吻合较好,进一步表明所建立的测试和分析方法的有效性。

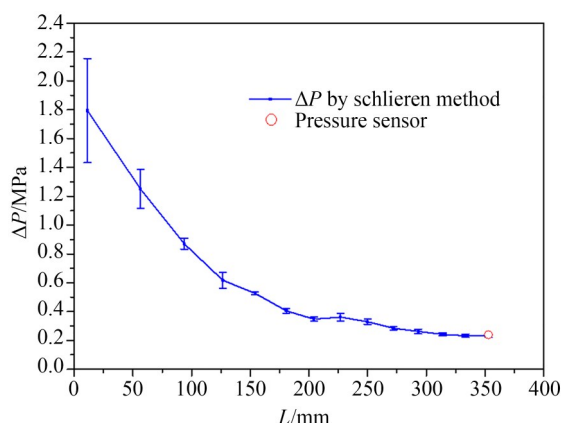


图 14 纹影图像法和压力传感器实测的冲击波超压峰值  
Fig. 14 Shock wave overpressure obtained by schlieren method and pressure sensors

## 参考文献:

- [1] 卢芳云, 蒋邦海, 李翔宇. 武器战斗部投射与毁伤 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
LU F Y, JIANG B H, LI X Y. *Projection and Damage of Weapon Warhead* [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [2] 王振宇, 任辉启. 国外大型爆炸波模拟装置设计研究综述[J]. 防护工程, 2009, 31(6): 72-79.  
WANG ZH Y, REN H Q. Review on design and research of large-scale explosion wave simulator abroad [J]. *Protective Engineering*, 2009, 31(6): 72-79. (in Chinese)
- [3] 郑监, 卢芳云, 陈荣. 柱形装药条件下锥形水中爆炸激波管内的冲击波特性[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(10): 78-89.  
ZHENG J, LU F Y, CHEN R. Shock wave characteristics in a conical water explosion shock tube under cylindrical charge condition [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(10): 78-89. (in Chinese)

当然,本文提出的高速纹影系统可观测的视场还相对较小,所计算的冲击波运动及其压力变化距离还较为有限。未来针对更大口径的爆炸激波管研制,需要进一步提高视场和数据处理能力,如设计阵列式纹影大视场测量系统等。

## 5 结 论

本文围绕爆炸激波管载荷设计中的冲击波与产物分离、波阵面形态等测量需求,将纹影系统和压力传感器结合,搭建了一套可用于出口流场特征诊断与分析的测试系统。该高速纹影系统能够清晰捕捉爆炸激波管管口冲击波和产物的运动演化图像、管中应力波引起的管口声波振动等过程。纹影测量结果与压力传感器中的数据振荡、压力突变、漂移等现象特征基本吻合。基于纹影图像计算获得的冲击波超压值与压力传感器结果基本一致,并较好地呈现了冲击波运动速度和压力的空间衰减规律。该测量结果对更好理解爆炸激波管冲击波载荷的形成和冲击波毁伤实验的设计具有重要意义。

- [4] 张军, 黄含军, 王军评, 等. 炸药驱动式爆炸管的载荷计算[J]. 装备环境工程, 2021, 18(5): 21-27.  
ZHANG J, HUANG H J, WANG J P, *et al.* Load calculation of explosive-driven explosive tube [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(5): 21-27. (in Chinese)
- [5] 姬建荣, 苏健军, 孔德仁, 等. 爆炸冲击波参数薄膜测试法研究[J]. 中国测试, 2016, 42(10): 21-24, 62.  
JI J R, SU J J, KONG D R, *et al.* The study on membrane method for parameter measurement of explosion shock wave [J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(10): 21-24, 62. (in Chinese)
- [6] 柴栋梁, 王文廉. 柔性传感冲击波瞬态压力测试方法[J]. 中国测试, 2018, 44(12): 91-95.  
CHAI D L, WANG W L. Test method of transient pressure of flexible sensing shock wave [J]. *China Measurement & Test*, 2018, 44(12): 91-95. (in Chinese)
- [7] 孔霖, 苏健军, 李芝绒, 等. 某压力传感器热冲击响应的抑制方法[J]. 传感器与微系统, 2010, 29

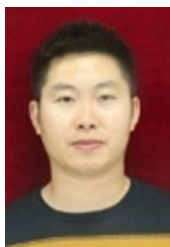


- (12): 69-72.
- KONG L, SU J J, LI ZH R, *et al.* A way to restrain the response of thermal impact of a pressure sensor[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(12): 69-72. (in Chinese)
- [8] CLOUGH L G, CLUBLEY S K. Steel column response to thermal and long duration blast loads inside an air blast tunnel[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2019, 15(11): 1510-1528.
- [9] 王海峰, 禄晓飞, 涂国勇, 等. 冲击波超压测量数据处理方法研究[J]. *现代防御技术*, 2020, 48(2): 69-73, 95.
- WANG H F, LU X F, TU G Y, *et al.* Research on data processing method of shock wave overpressure measurement[J]. *Modern Defence Technology*, 2020, 48(2): 69-73, 95. (in Chinese)
- [10] 张衍芳. 冲击波信号处理方法的研究[D]. 太原: 中北大学, 2011.
- ZHANG Y F. *Research on Shock Wave Signal Processing Method*[D]. Taiyuan: North University of China, 2011. (in Chinese)
- [11] 朱海军, 王倩, 梅笑寒, 等. 基于高速纹影/阴影成像的流场测速技术研究进展[J]. *实验流体力学*, 2022, 36(2): 49-73.
- ZHU H J, WANG Q, MEI X H, *et al.* A review on flow field velocimetry based on high-speed schlieren/shadowgraph systems[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2022, 36(2): 49-73. (in Chinese)
- [12] LAURENCE S J, WAGNER A, HANNEMANN K. Experimental study of second-mode instability growth and breakdown in a hypersonic boundary layer using high-speed schlieren visualization[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 797: 471-503.
- [13] 吴军, 宋丰成, 潘智祥, 等. 采用干涉条纹纹影法的轴对称温度场测量[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(2): 150-159.
- WU J, SONG F CH, PAN ZH X, *et al.* Axisymmetric temperature field measurement using interference fringe schlieren method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(2): 150-159. (in Chinese)
- [14] 张雄星, 王伟, 刘光海, 等. 温度场纹影定量测量技术[J]. *中国光学*, 2018, 11(5): 860-873.
- ZHANG X X, WANG W, LIU G H, *et al.* Quantitative measuring technique for the temperature of flow fields in schlieren systems[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 860-873. (in Chinese)
- [15] 李斌, 王雨, 周志强, 等. 爆炸冲击波威力高速纹影测量方法[J]. *光学与光电技术*, 2018, 16(2): 43-49.
- LI B, WANG Y, ZHOU ZH Q, *et al.* High-speed schlieren photography for measuring the explosive blast wave power[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2018, 16(2): 43-49. (in Chinese)
- [16] 郑星, 黄海莹, 毛勇建, 等. 基于高速纹影技术的爆炸冲击波图像测量研究[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(18): 2187-2194.
- ZHENG X, HUANG H Y, MAO Y J, *et al.* Research on image measurement of explosion shock wave based on high-speed schlieren technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(18): 2187-2194. (in Chinese)
- [17] 胡洋, 尹尚先, BJORN A J, 等. 矿井瓦斯/空气预混气体爆燃的激光纹影测试系统设计[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 1045-1051.
- HU Y, YIN SH X, BJORN A J, *et al.* Design of laser schlieren test system for mine gas/air premixed gas deflagration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1045-1051. (in Chinese)
- [18] 王波, 杜扬, 李国庆, 等. 细长密闭管道内油气爆炸特性研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(9): 80-85, 145.
- WANG B, DU Y, LI G Q, *et al.* Tests for explosion characteristics of gasoline-air mixture in an elongated closed tube[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(9): 80-85, 145. (in Chinese)
- [19] 王保国, 高歌, 黄伟光. 非定常气体动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- WANG B G, GAO G, HUANG W G. *Unsteady Aerodynamics* [M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2014. (in Chinese)
- [20] MITH P D, HETHERINGTON J G. *Blast and Ballistic Loading of Structures* [M]. Boston: Butterworth-Heinemann, 1994.
- [21] 高光发. 波动力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- GAO G F. *Foundations of wave mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)

- [22] 胡明. 不同制备方法的火炮身管材料Cr涂层性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.  
HU M. *Study on Properties of Cr Coating of Gun*

*Barrel Materials Prepared by Different Methods*  
[D]. Taiyuan: North University of China, 2019.  
(in Chinese)

作者简介:



张 军(1988—),男,重庆垫江人,博士,副研究员,2015年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事爆炸与冲击动力学试验与测试技术的研究。  
E-mail: aabuzhangjun@foxmail.com

通讯作者:



毛勇建(1976—),男,四川简阳人,博士,研究员,2010年于西北工业大学获得博士学位,主要从事爆炸与冲击动力学试验与测试技术的研究。E-mail: maoyj@caep.cn