

文章编号 1004-924X(2024)15-2355-08

大口径爆炸激波管出口冲击波流场图像测量

郑 星, 黄海莹*, 毛勇建, 张 军, 周 东

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为了获取大视场下爆炸冲击波的纹影图像以及冲击波与被测模型相互作用后的流场演化特征, 开展了基于聚焦纹影的反射式高速纹影测试。利用激光光源和高反射膜建立了系统所需的光源输入, 并通过简化刀口栅设计, 实现了远距离大口径爆炸激波管出口冲击波流场图像演化特征以及与固体模型相互作用的高时空分辨特征。研究表明, 设计的聚焦式反射纹影系统在 80 m 以上距离处获取了大口径大当量爆炸激波管出口处 $6\text{ m} \times 3\text{ m}$ 视场的冲击波特征, 以及与固体相互作用的高时空分辨图像和状态数据; 相比传统聚焦纹影系统, 该系统具有结构简单、可实现性强、测试距离远, 覆盖视场大等特点; 通过设计不同光源输入, 探讨了激光光源在远距离拍摄中的优势; 通过冲击波阵面与固体模型的相互作用特征, 揭示了冲击波作用于被测固体模型后的形成、演化和绕流状态。该测量结果能够为武器装备在受到冲击波作用后的状态评估和响应特性分析提供直观的图像数据支撑。

关键词: 聚焦纹影; 大视场; 冲击波图像; 爆炸激波管

中图分类号: O384; TP391.41 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243215.2355

Image measurement of shock wave flow field at outlet of large diameter explosion shock tube

ZHENG Xing, HUANG Haiying*, MAO Yongjian, ZHANG Jun, ZHOU Dong

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

* Corresponding author, E-mail: hhy-1516@163.com

Abstract: To capture schlieren images of explosion shock waves over a large field of view and analyze the flow field evolution after shock wave interaction with a model, a reflective high-speed schlieren measurement technique based on focused schlieren was developed. The system uses a laser source and high reflective film for input. By simplifying the knife-edge grid design, the shock wave flow field evolution at the outlet of a long-distance, large-aperture explosion shock tube and its high-resolution interaction with a solid model are achieved. At a distance of over 80 m, shock wave characteristics were obtained from a large-caliber, high-yield explosion shock tube with a $6\text{ m} \times 3\text{ m}$ field of view, along with high temporal and spatial resolution images and state data regarding interactions with solids. The study shows that the designed focused schlieren system is simpler, more feasible, and offers a longer test distance and wider field of view than traditional systems. By altering the light source input, the benefits of a laser source for long-distance imaging are explored. The interaction between the shock wave front and the solid model reveals the formation, evolution, and flow state of the shock wave on the model. These measurements provide visual data

收稿日期: 2024-04-07; 修订日期: 2024-06-18.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12072334)

to support the evaluation and response analysis of weapons and equipment subjected to shock waves.

Key words: focus schlieren; large field of view; shock wave image; explosive shock tube

1 引言

装备在高速流场作用下的功能、性能及结构响应特征是衡量其性能的重要指标之一。与此同时,当流场作用于目标对象后的边界层湍流流场信息也是评估其状态变化的重要依据。传统测量方法大多通过对流场压力特征的测量,从压力量值上实现加载量的监测、校准以及对产品结构状态变化的评估^[1-3]。因此,通过对高速流场压力的图像测量并结合流场压力峰值等信息,能够实现对被测对象的全面分析和状态评估。

纹影测量技术作为一种流场图像测量手段,已广泛的应用于风洞、气体燃烧、冲击波、高超声速边界层等环境中的流场测量^[4-7]。常用的纹影测量技术主要有“Z”字形光路纹影测量技术和聚焦纹影测量技术。前期已经利用基于“Z”字形光路的纹影测量系统实现了 500 mm 内爆炸波模拟装置出口高速冲击波流场的图像测量,获取了冲击波流场演化和反射波特征等典型信息,改进了大口径爆炸激波管的设计^[8-9]。但是由于受到光学透镜和反射镜尺寸的限制,超过 800 mm 以上的光学透镜和反射镜成本巨大,且在大当量爆炸激波管中,反射镜易受出口冲击波压力和破片作用,从而导致设备受损,影响使用。聚焦纹影技术由于不需要大型反射镜参与光路设计,在大视场纹影测量中具有可行性。典型的聚焦纹影系统主要由光源、菲涅尔透镜、源格栅、聚焦透镜、刀口栅和成像面等组成,在此基础上,美国国家航空航天局(NASA)又衍生出多种类型的聚焦纹影系统,以满足不同的应用环境需求,但是却未见在大视场场景下开展测试的相关报道^[10-12]。美国圣地亚实验室在激波管试验中开展了大视场场景下的冲击波纹影测试,但是技术细节不详。中国空气动力研究与发展中心的研究人员针对风洞试验中的大视场流场图像测试需求,开展了一系列纹影技术研究。谢爱民^[13]等提出了基于光源拼接的大视场聚焦纹影技术,并通过多个 LED 光源的拼接,验证了该技术在大气纹影测量上的可行性。岳茂雄^[14]等在实验室搭建

了一套基于发散光式的反射式聚焦纹影显示装置,获得的视场直径约为 1.5 m。然而,大口径爆炸激波管的冲击波压力图像测量,由于涉及大当量炸药爆炸和大量飞片等因素,测试系统需满足工作距离远、拍摄视场大的要求,因此,上述研究成果尚不能完全覆盖该应用场景。同时,爆炸激波管试验药量大,通过激波管整形后的冲击波阵面速度远超过声速,普通的成像面不能捕捉到更多的波阵面特征信息,因此在超声速流场测试中,通常将系统中的成像面换成高速相机,可获取几倍于声速的流场特征^[15]。

上述研究成果证明了反射式聚焦纹影系统应用于大视场纹影测量的技术可行性,但是在基于爆炸激波管场景下的大视场纹影测量中,受限大尺寸源格栅的制作难度,目标视场不可能太大,因而,在大口径大当量爆炸激波管中所能观测到的冲击波阵面演化过程和特征信息有限,同时由于爆炸飞片的原因,近距离测试会严重破坏光学测试系统。针对上述问题,本文在现有反射式聚焦纹影技术的基础上,改进了光路系统,放弃使用制作困难的大尺寸源格栅,并将与源格栅对应的长条形刀口栅换成圆形刀口,不仅有效增加了纹影视场面积,还大大降低了测试系统搭建的难度和调试工作量。该纹影测试系统在 80 m 以上距离处获取了大口径大当量爆炸激波管出口处 6 m×3 m 视场的冲击波特征以及与固体相互作用的高时空分辨图像和状态数据,可为装备的流固耦合数值模拟、结构改进和状态评估提供强有力的图像数据支撑。

2 原理

光在非均匀介质中传播时会发生不同程度的偏折,导致成像装置上光的明暗程度发生变化。当爆炸冲击波作用于均匀流场时,冲击波的挤压作用导致被测区域原本均匀的流场发生不同程度的密度变化,从而引起光在该区域的折射率梯度发生改变,最终在成像装置上表现为明暗程度不同的图像。

由于大口径爆炸激波管出口处冲击波作用面积广、压力高,且通常伴随有飞溅物,特别是冲击波作用于被测目标时会产生大量的飞片,大概率会损坏测试系统的光学器件。因此,本文采用一字形光路布局,设计了一种远距离长焦距大视场的光学纹影测量装置,如图 1 所示。该系统借助太阳光作为系统入射光源,但是受太阳运动和位置关系限制,太阳光作为系统入射光的实用性不强。因此,本系统采用点光源作为系统光源,通过反射背景板将点光源照射光线反射进透镜作为系统的入射光源,如图 1 所示。点光源通过扩束镜后穿过含有可压缩流场的实验段照射到反射背景板,反射背景板反射点光源照射的光线,反射光再次经过可压缩流场的实验段,然后进入主透射镜并聚焦于刀口位置,最后成像于 CCD 阵面上。实验时,在主透射镜和反射背景板之间会形成一个流场扰动区,该区域的空气受冲击波压缩时,其纹影图像会反映在成像装置上。为了便于调节并控制通光量,本系统采用圆形刀口装置,反射背景板则由细小的网格区组成,每个网格区由较小的晶状结构组成,可以使光源照射的光线按照一个较小的发散角原路返回,从而增加光源的有效利用率。

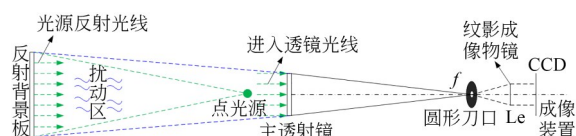


图 1 纹影仪基本原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of schlieren system

设光源通过刀口后的像宽为 w , 垂直画面高度为 h , 当检测区域流场未发生变化时, 到达高速相机 CCD 阵面上任意点 (x, y) 的光强 I 为常数, 其均匀照度为:

$$I(x, y) = k I_0 \frac{wh}{f}, \quad (1)$$

其中: I_0 为光源的初始强度, k 为光源到刀口路径上的光强损失的吸收系数, f 为照相透镜的焦距。式(1)忽略了光学系统的几何相差。

当冲击波进入扰动区时, 流场被压缩导致扰动区的空气折射率发生变化; 当光线通过扰动区时, 折射率的变化导致光线发生偏折引起光强变化。由光源照度与折射角的关系可以得出光强

与折射率梯度产生的偏折角关系为:

$$\frac{\Delta I}{I} = \frac{f}{w} \int_0^n \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} dz, \quad (2)$$

其中: w, f 已知, 分别为光源像的宽度和透镜焦距; n 为扰动区某一点处的折射率。由式(2)可知, 当光线通过扰动区时, 冲击波阵面的变化通过空气折射率梯度的变化反映为光强变化, 在 CCD 成像模块上就表现为图像灰度的变化, 从而显现出冲击波阵面。

3 测试系统设计

3.1 爆炸激波管加载系统

爆炸激波管管口直径为 2 m, 炸药柱悬挂于激波管尾端, 如图 2 所示。实验时, 引爆炸药产生冲击波, 通过管路将冲击波整形为近似平面波, 然后作用于被测对象, 最后通过纹影测试系统观测管口冲击波的形态特征, 以及冲击波作用于目标对象后的演化和目标对象的高时空变形状态。

3.2 测试系统

测试系统如图 2 所示, 采用一字形光路布局, 由高速相机、刀口、成像系统、光源和反光背景板组成。为了防止管口爆炸冲击波对纹影测试设备的影响, 同时满足大视场远距离测试需求, 该测试系统的设计视场角为 $\pm 2^\circ$, 与爆炸激波管管口的垂直距离约为 86 m。当冲击波到达测试系统与反光背景板之间形成的光路扰动区时, 空气密度发生变化, 导致光的折射率发生改变, 光线发生偏离, 在原本均匀的视场上呈现出明暗不同的边界面, 即为冲击波阵面图像。

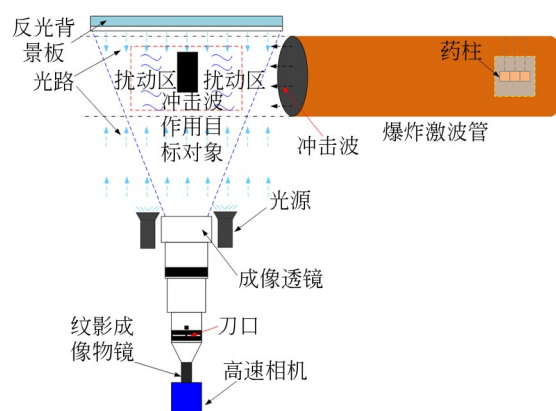


图 2 反射式聚焦纹影测试系统

Fig. 2 Layout of reflective focusing schlieren test system

3.3 光源系统

本文分别利用白光光源和单色激光光源作为系统的光源,探讨不同光源在远距离状态下对冲击波纹影测试的影响。光源距离目标区域 86 m 左右,白光光源采用 3 个 2 000 W 的 LED 灯对目标区域进行照射,激光光源采用一个 8 W 的 650 nm 的单色激光进行照射,覆盖 6 m×3 m 的视场范围,观测视场由 4 块宽 1.5 m、高 3 m 的钢架组成。为了能够产生均匀的光源背景,在每块钢架上覆盖特殊的光源反射膜,反射膜由细小的网格区组成并均匀分布于整个反射面,反射膜每个网格区由较小的晶状结构组成,使入射光线能够以较小的发散角原路返回,从而增加光能的有效利用率。

3.4 刀口系统

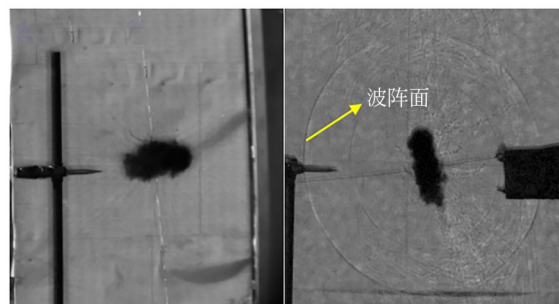
传统的刀口系统采用刀口栅方式进行光源切割,本文采用圆形刀口对光源进行切割,结构简单,制作方便。当偏折光线到达刀口位置时,光线会偏离原有位置,导致系统接收到的光通量发生变化,发生扰动的流场区域图像灰度也随之改变。

4 实验结果与分析

4.1 光源对冲击波图像特征的影响

系统入射光线的强弱直接决定了所测冲击波的纹影效果,光线越强扰动越明显,光线越弱越不容易分辨出空气的扰动。在反射式聚焦纹影测试系统中,由于透镜距离被测区域较远,光线发散角大,衰减较多,经过长距离传输后进入透镜的光强较为微弱,导致空气扰动无法识别。因此,为了获取不同光源下的测试效果,分别利用白光光源和激光光源对雷管爆炸后的冲击波纹影形态进行观测,结果如图 3 所示。

由图可见,白光光源照射的目标区域,雷管爆炸后冲击波纹影效果不明显;而激光光源照射的目标区域,在雷管爆炸后可以清晰显示整个冲击波的形成和演化过程。其原因为:由于距离太远,白光光源光线经反射膜后衰减严重,进入成像透镜的光线较弱,导致雷管爆炸产生



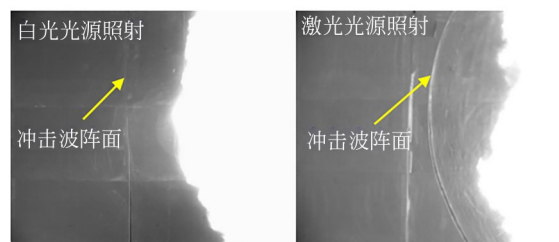
(a) 白光光源照射 (b) 激光光源照射
(a) White light source irradiation (b) Laser light source irradiation

图 3 不同光源照射下雷管爆炸产生的冲击波图像状态
Fig. 3 Image state of shock wave produced by detonator explosion under different light sources

的空气扰动界面不明显,从图 3(a)中只能看到微弱的空气扰动。而激光光源照明的扰动区域,通过反射膜进入成像透镜的光线较强,当雷管爆炸引起空气扰动时,便会形成对比度明显的边界面,如图 3(b)图所示。由式(2)可知,扰动区折射率梯度的变化最终会通过光线的偏折反映为光强的变化,但是当折射率梯度一定时,光强的变化量通过光线的强弱来体现,光线越强边界越明显。因此,在观测微弱扰动的情况下,通过增加成像透镜的入射光强,能够获得更明显的扰动图像。

为了进一步验证光源在大当量爆炸激波管实验中对冲击波图像的影响,本文在爆炸激波管尾部利用 100 kg 量级的 TNT 炸药爆炸产生强冲击波,在激波管出口处利用设计的纹影测试系统观测冲击波流场,测试结果如图 4 所示。

由图 4 可见,在正式的爆炸激波管实验中,采用激光光源作为系统光源输入的冲击波阵面纹



(a) 白光光源照射 (b) 激光光源照射
(a) White light source irradiation (b) Laser light source irradiation

图 4 爆炸环境下不同光源下的冲击波纹影图像
Fig. 4 Shock schlieren image under different light sources in explosion environment

影图像效果(图 4(b))明显优于白光光源照射的冲击波阵面图像(图 4(a)),图 4(b)中可以清晰地观测到冲击波阵面的形态及其运动特征信息,图 4(a)中虽然存在冲击波纹影,但是扰动不明显。同时,爆炸产生的强光会导致相机 CCD 传感器部分光饱和,当冲击波阵面与爆炸火球分离后,由于两者的空间位置不同,其折射率梯度变化反映在 CCD 阵面上的不同位置,因此,爆炸产生的强光对冲击波纹影图像的影响不大。

4.2 爆炸冲击波阵面的速度表征

冲击波纹影图像测量不仅可以获取冲击波与爆炸火球的分离状态以及分离后的运动形态特征,还可以直观地获取不同时刻冲击波的速度信息。在 100 kg 量级的爆炸激波管实验中,冲击波与火球在到达第二块钢架后开始分离,因此选取后三块钢架范围内冲击波图像作为速度分析对象。图中,三块钢架紧密相连,每块钢架宽 1.5 m,高 3 m,冲击波在图像范围内的运动历程如图 5 所示。

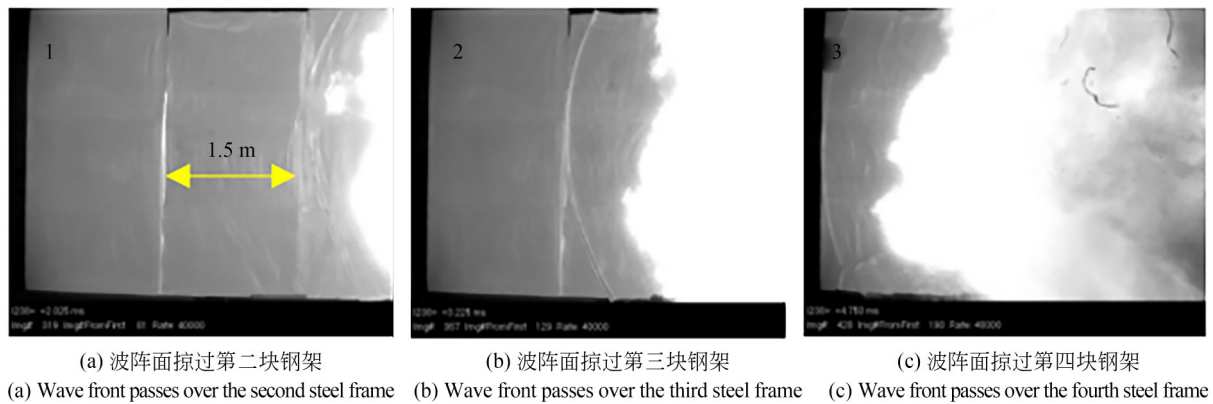


图 5 冲击波阵面到达不同钢架边缘图像

Fig. 5 Image of shock wave front reaching different steel frame edge

高速相机拍摄帧频为 40 000 frame/s,由于冲击波阵面在第一块钢架范围内还未能与火球完全分离,因此,以冲击波阵面到达第二块钢架边缘时刻为零点,冲击波阵面掠过第 2 到第 4 块钢架的相对时间分别为 1,1.18,1.3 ms,对应各钢架范围内的平均速度如表 1 所示。

表 1 不同钢架范围内冲击波阵面速度
Tab. 1 Shock wave front velocity in different steel frame ranges

钢 架	冲击波阵面掠过 钢架时间/ms	平均速度 /(m·s ⁻¹)
第二块	1	1 500
第三块	1.18	1 271
第四块	1.3	1 154

表 1 揭示了冲击波阵面在不同时刻的速度信息,符合冲击波在空气中的运动特征,通过 Rankine-Hugoniot 公式^[16]可以近似求得冲击波阵面处的压力量级,为武器装备的冲击波加载考核实

验提供设计依据,同时通过获取的大视场冲击波阵面状态信息,还可为武器装备的冲击波加载状态和实验后的性能状态评估提供分析依据。

4.3 冲击波作用于被测目标的特征行为

为了获取冲击波阵面作用于被测模型后的演化特征信息以及固体模型在受到冲击波作用后的状态特征,本文利用 20 kg TNT 炸药产生的冲击波作用于被测模型。为了更清晰地观测冲击波作用于被测模型的特征信息,避免爆炸火球覆盖被测模型,对激波管实验进行特殊设计,使爆炸产生的火球与冲击波的运动方向相反,从而消除爆炸火球对被测模型的影响,爆炸冲击波作用于被测模型的演化及状态特征如图 6 所示。

冲击波阵面作用于被测模型前的形态如图 6(a)所示,在模型范围内冲击波阵面以近似平面波的形式向前传播,并以约 880 m/s 的速度作用于被测模型;作用于被测模型时发生反射,如图 6(b)所示,掠过被测模型后的绕流和形态变化如图 6(c)~6(e)所示,在图 6(f)中还可明显地观测

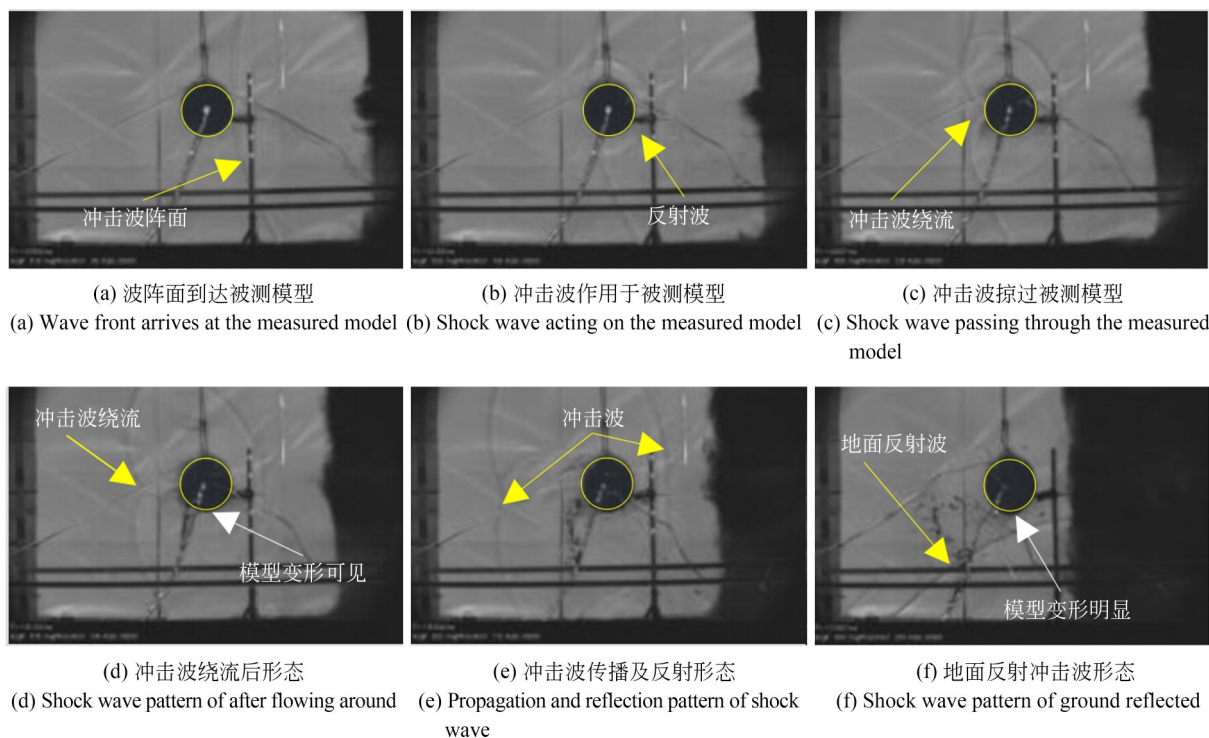


图 6 冲击波作用于被测模型后的演化特征

Fig. 6 Evolution characteristics of shock wave acting on the measured model

到由地面反射引起的冲击波形态;图 6(a)~6(f) 圆形区域还显示出冲击作用于被测模型后模型的变形时刻及状态。

通过布置在被测模型前的自由场压力传感器以及模型上正对来流面的壁面压力传感器,可以得到冲击波阵面作用于被测模型前以及作用在被测模型上的压力峰值,如图 7 所示。波阵面到达安装在被测模型前的自由场压力传感器时压力峰值约为 0.9 MPa,0.324 ms 后波阵面作用于被测模型上,压力峰值约为 2.6 MPa。

对比波阵面到达自由场压力传感器敏感面以及作用于被测模型时的纹影图像,如图 8 所示。高速相机的拍摄帧频为 38 000 frame/s,两幅图像间隔 12 帧,共计 0.316 ms,与所测压力曲线的起峰时间间隔吻合。此外,在冲击波起峰前曲线出现 0.1 ms 左右的抖动,由纹影图像可知,该抖动持续时间与冲击波到达压力传感器顶端和敏感面时的间隔时间相吻合,因此,可以推断该抖动是由冲击波阵面作用压力传感器所致。

在一维假设下,冲击波的密度、压力和速度之间近似满足 Rankine-Hugoniot 关系^[16],因此,可以通过速度计算出冲击波波阵面压力。具体

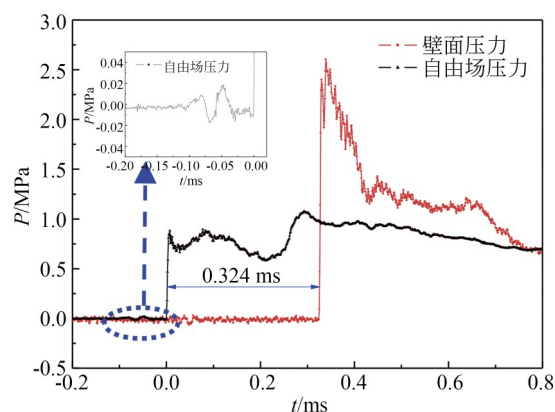


图 7 冲击波压力曲线

Fig. 7 Curves of shock wave pressure

公式如下:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \left(\frac{v_s}{v_0} \right)^2 - \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}, \quad (3)$$

式中: p_1, p_2 分别为激波前后的压力, v_s 为冲击波的运动速度, v_0 空气中的声速, γ 为气体的比热比,对空气而言取值为 1.4。 p_1 为常温下的大气压力 0.101 MPa, 空气中的声速取 340 m/s, 通过纹影图像计算可知, 冲击波阵面到达压力传感器敏感面时的速度 v_s 约为 950 m/s。由式(3)计算

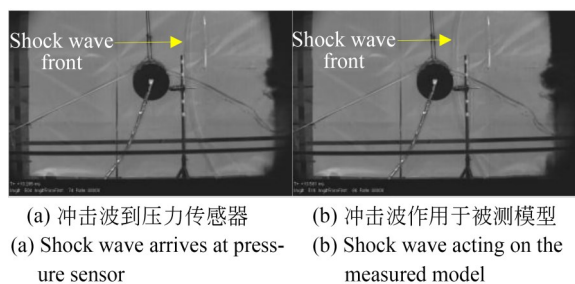


图 8 不同时刻冲击波阵面的纹影图像

Fig. 8 Schlieren images of shock wave front at different time

可得,冲击波阵面到达压力传感器敏感面时的压力约为 0.92 MPa,与自由场压力传感器测得的压力峰值基本吻合。

综上所述,该纹影系统不仅完整地得到了冲击波阵面的形成、演化过程,还获取了冲击波阵面与固体模型相互作用后的高时空分辨变形,从而为冲击波压力曲线的特征信号分析提供了支撑,并且通过纹影测得的冲击波阵面速度还进一步求得了不同时刻的冲击波压力峰值。上述测量结果能够为冲击波作用下的流固耦合分析以

及武器装备在高速流场作用下的结构响应及状态特征分析提供直观的数据分析依据。

5 结 论

针对武器装备在爆炸冲击波作用下的响应特性分析,利用大口径爆炸激波管作为加载方式,采用基于激光光源的聚焦反射式纹影测量技术,获取了爆炸激波管出口处的冲击波图像特征以及与固体模型相互作用后的演化、反射、绕流和传播路径等高时空分辨状态特征,直观获取了固体模型在冲击波作用下不同时刻的变形状态以及冲击波的作用机制。实验结果表明:本文设计的聚焦式反射纹影系统在 80 m 以上距离处获得了大口径大当量爆炸激波管出口处 6 m×3 m 视场的冲击波特征,以及与固体相互作用的高时空分辨图像和状态数据,具有结构简单、操作方便等特点,能够满足远距离大视场下爆炸冲击波的纹影测量,对爆炸冲击波的作用机制以及武器装备在爆炸冲击波作用下的性能分析和状态评估具有重要意义。

参考文献:

- [1] SHI Y C, KONG D R, MA X J, *et al.* Dynamic calibration method of blast pressure pencil probes based on adjustable shock tube[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(11): 11704-11712.
- [2] PARK G K, MOON J H, SHIN H S, *et al.* Blast resistance capacities of structural panels subjected to shock-tube testing with ANFO explosive[J]. *Materials*, 2023, 16(15): 5274.
- [3] 李烽,李典,侯海量,等. 基于密闭空间内爆的核爆冲击波载荷模拟试验和数值计算方法[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(17): 138-144.
LI Y, LI D, HOU H L, *et al.* Analog tests and numerical calculation method of nuclear explosion shock wave load based on closed space implosion[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(17): 138-144. (in Chinese)
- [4] LI Y C, ZHANG B. Visualization of ignition modes in methane-based mixture induced by shock wave focusing[J]. *Combustion and Flame*, 2023, 247: 112491.
- [5] HILL J L, BORG M P, BENITEZ E K, *et al.* Implementation of self-aligned focusing schlieren for hypersonic boundary layer measurements [C]. *Proceedings of the AIAA SCITECH 2023 Forum. National Harbor, MD & Online. Reston, Virginia: AIAA*, 2023: AIAA2023-2438.
- [6] YAMAMOTO S, SHIMAZAKI T, FRANCO-GÓMEZ A, *et al.* Contactless pressure measurement of an underwater shock wave in a microtube using a high-resolution background-oriented schlieren technique [J]. *Experiments in Fluids*, 2022, 63(9): 142.
- [7] MARTÍNEZ-GONZÁLEZ A, MORENO-HERNÁNDEZ D, GUERRERO-VIRAMONTES J A, *et al.* Multiplane temperature measurement of fluid flows using a color focusing schlieren system [J]. *Optics Laser Technology*, 2021, 142: 107256.
- [8] 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].

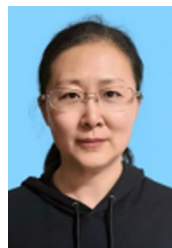
- Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(18): 2187-2194. (in Chinese)
- [9] 张军, 黄含军, 毛勇建, 等. 爆炸激波管出口流场特征的纹影诊断与分析[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(19): 2789-2798.
- ZHANG J, HUANG H J, MAO Y J, *et al.* Schlieren diagnosis and characteristic analysis of outlet flow field for blasting shock tube[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(19): 2789-2798. (in Chinese)
- [10] WEISBERGER J M, BATHEL B F. Single source/cutoff grid, self-aligned focusing schlieren system [J]. *Experiments in Fluids*, 2022, 63(1): 38.
- [11] BATHEL B F, WEISBERGER J M. Development of a self-aligned compact focusing schlieren system for NASA test facilities[C]. *Proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum. San Diego, CA & Virtual. Reston, Virginia: AIAA*, 2022: AIAA2022-0560.
- [12] WEISBERGER J M, BATHEL B F. Colinear focused laser differential interferometry and self-aligned focusing schlieren [J]. *Applied Optics*, 2023, 62(18): 4958-4970.
- [13] 谢爱民, 邵绍清, 罗锦阳. 基于光源拼接的大视场聚焦纹影技术初步研究[J]. *实验流体力学*, 2018, 32(6): 68-73.
- XIE A M, BU SH Q, LUO J Y. Primary study of large-field focusing schlieren technique based on tiled light sources [J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2018, 32(6): 68-73. (in Chinese)
- [14] 岳茂雄, 张弯洲, 吴运刚, 等. 基于发散光反射式布局的大视场显示方法研究[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(3): 77-82.
- YUE M X, ZHANG W ZH, WU Y G, *et al.* Research on large field visualizaiton based on divergent light reflective layout[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2021, 35(3): 77-82. (in Chinese)
- [15] BATHEL B F, HERRING G C, WEISBERGER J M, *et al.* Simultaneous focused laser differential interferometry and high-speed schlieren in a Mach 6 flow [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(9): 095907.
- [16] 王保国. 非定常气体动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- WANG B G. *Unsteady Aerodynamics* [M]. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2014. (in Chinese)

作者简介:



郑 星(1987—),男,贵州凤冈人,硕士,高级工程师,2013年于重庆大学获得硕士学位,主要从事试验测试技术的研究。E-mail: hjzhengx@caep.cn

通讯作者:



黄海莹(1973—),女,湖南宁乡人,硕士,高级工程师,2003于南京理工大学获硕士学位,主要从事试验测试技术的研究。E-mail: hhy-1516@163.com