DOI: 10.11883/bzycj-2016-0241 文章编号: 1001-1455(2018)02-0437-06

炸药水中爆炸冲击波超高速同时分幅/扫描摄影技术*

畅里华,何 徽,温伟峰,李金河,王 旭,冉茂杰
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 研究了超高速同时分幅/扫描摄影技术在炸药水中爆炸冲击波传播中的应用效果,并采用自研的同时分幅/扫描超高速光电摄影系统对炸药水中爆炸过程进行拍摄。结果表明,该系统能够拍摄同一时基、同一空基且具有超高时空分辨的一维和二维图像,进而成功观察到∅60 mm×66 mm TNT 炸药在水中爆炸冲击波传播过程,获得该过程冲击波阵面平均传播速度及压力。这可为水中兵器战斗部的设计及毁伤效能评估提供参考。

关键词: 炸药;水中爆炸;超高速摄影;同时分幅/扫描光电相机
中图分类号: O384 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

在水下武器效应研究中,炸药水下爆炸特性是非常重要的研究内容,特别是爆炸所形成的冲击波,它是形成损伤效应的最重要的因素之一。由于冲击波在水下扩散时能量损失迅速,因此为提高爆炸损伤能力,需要使它尽可能在近场范围内发挥效果,这就使得开展水下爆炸近场冲击波特性研究显得尤为重要[1]。其中,炸药水中爆炸冲击波阵面的形状、发展过程及不同方向的传播速度是实验中最为基本、关键的参数,对于炸药水中爆炸实验的设计、数值模拟及实验装置的改进,都起着极为重要的作用。鉴于炸药水中爆炸冲击波传播速度快的技术特点,高速摄影就成为光学测试技术中一个不可或缺的测试手段[2-3]。目前,在水中爆炸近场中采用的测试技术主要是用分幅或扫描摄影技术获得不同时刻冲击波头数据,从而推导出峰压衰减规律[4-6]。在我国,在水中爆炸近场光学测试方面做的工作较少,赵继波等[7-8]、李金河等[9]采用高速转镜扫描相机或分幅相机拍摄了炸药水中爆炸轴向冲击波传播一维时间或二维空间像,一维时间和二维空间、光强度等信息不能在同一发实验中同时获得,且不是同一时基、同一空基,不具有可比性。

本文中,采用自研的超高速同时分幅/扫描摄影系统首次拍摄炸药水中爆炸冲击波传播过程同一时基、同一空基且具有超高时空分辨的一维(水平和垂直同时扫描)和二维图像,不仅能观察炸药水中爆炸冲击波阵面在传播过程中的形状变化,而且可获得该过程径向和轴向的冲击波传播速度及冲击波阵面压力。

1 实 验

1.1 爆炸装置

爆炸装置主要由雷管、传爆药、主装药柱、支撑架等组成。所用主装药为 TNT,尺寸约为∅60 mm×66 mm,密度为 1.580 g/cm^3,用支撑架将爆炸装置置于水箱中部处于悬空的状态,悬空高度为水箱高度的一半。雷管及其引脚与起爆电缆的结合部严格密封,入水电缆具有良好的水密性。炸药水中爆炸实验装置结构如图 1 所示。

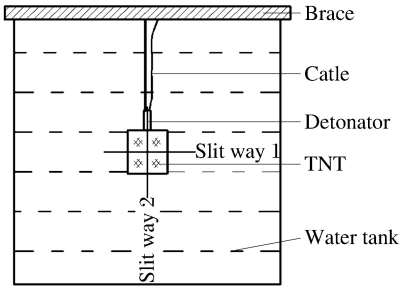


图 1 炸药水中爆炸实验装置结构图
Fig. 1 Experimental configuration of underwater explosion

* **收稿日期**: 2016-08-16; **修回日期**: 2016-12-05
基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项项目(2011YQ130019)
第一作者: 畅里华(1974—),女,学士,高级工程师; **通信作者**: 温伟峰,pleague@126.com。

同时分幅/扫描超高速光电摄影系统分幅成像组件对实验装置整个视场成像，扫描成像组件对主装药柱径向和轴向同时成像。

1.2 测试装置

炸药水中爆炸冲击波传播超高速同时分幅扫描摄影测试布局如图 2 所示。脉冲氙灯光源经照明物镜照明被摄区域，经反射镜、相机物镜成像在超高速同时分幅/扫描光电相机上。由于冲击波传播过程极快，实验过程中，为拍摄到稳定、可靠的冲击波传播过程图像，必须保证超高速摄影系统拍摄时刻、脉冲氙灯光源发光时刻及冲击波传播的形成和发展时刻精确同步[10]。

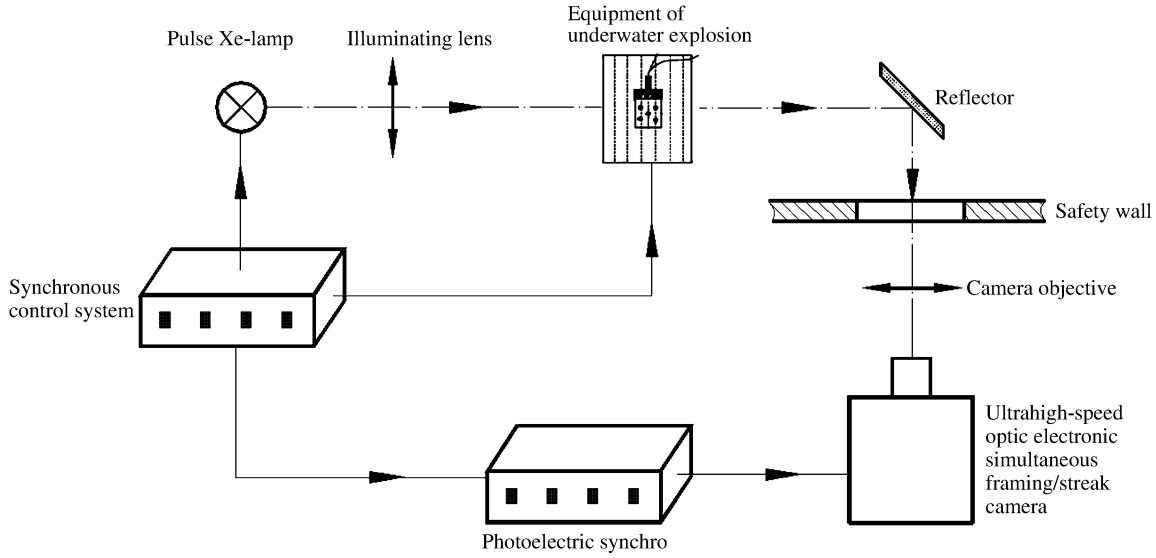


图 2 炸药水中爆炸冲击波传播超高速摄影装置布局图

Fig. 2 Layout of ultrahigh-speed photography equipment for observing underwater-explosion shock wave propagation

实验过程中，由于起爆装置伴随有高电压和大电流，这些因素轻则会导致同时分幅/扫描超高速光电相机误触发，重则甚至会引起相机工作不正常、图像丢失。为避免该问题，实验时，对相机整体通过电屏蔽箱屏蔽，相机与同步控制器之间通过光电转换器转换为光信号再连接，同时相机与计算机之间的控制和数据接口全部采用光纤传输。通过以上改进，实现了目标起爆时刻与相机拍摄时刻的精确同步，可靠获得炸药水中爆炸冲击波传播过程同一时基、同一空基具有高时空分辨的一维和二维清晰图像[11]。

2 结果及分析

图 3 是用同时分幅/扫描超高速光电相机拍摄的∅60 mm×66 mm 炸药在 400 mm×400 mm×400 mm 水箱中爆炸冲击波传播过程一维时间和二维空间的图像信息，炸药材料为 TNT，t 所对应的时刻均以炸药爆炸起始时刻为零时。分幅成像拍摄条件：画幅数为 6，每幅时间间隔分别为 5、5、5、10、10 μs，曝光时间为 20 ns。扫描成像拍摄条件：扫描时间为 100 μs，扫描速度为 0.12 km/s，画幅数为 2，水平 x 方向、垂直 y 方向同时扫描。分幅成像拍摄到炸药水中爆炸冲击波传播变化过程，记录了冲击波传播过程二维空间信息和抽样时间信息；扫描成像得到炸药水中爆炸冲击波传播轴向、径向冲击波阵面界面变化过程，记录了冲击波传播轴向和径向连续时间信息和一维空间信息。从 6 幅分幅图像，可清楚地观察到炸药水中爆炸冲击波的传播和爆轰产物的膨胀过程：当爆轰未完成时，在药柱长度范围内水中冲击波与爆轰波一起沿药柱表面母线移动，他们在药柱表面交点处的移动速度相同；当爆轰完成后，水中冲击波开始以自己的速度在水中传播，水中冲击波阵面形状呈椭圆形且形状不规则。从 2 幅扫描图像可以看出，垂直扫描 y 方向（径向）冲击波传播过程对称性较好，传播速度基本一致，水平扫描 x 方向（轴向）冲击波传播较快。

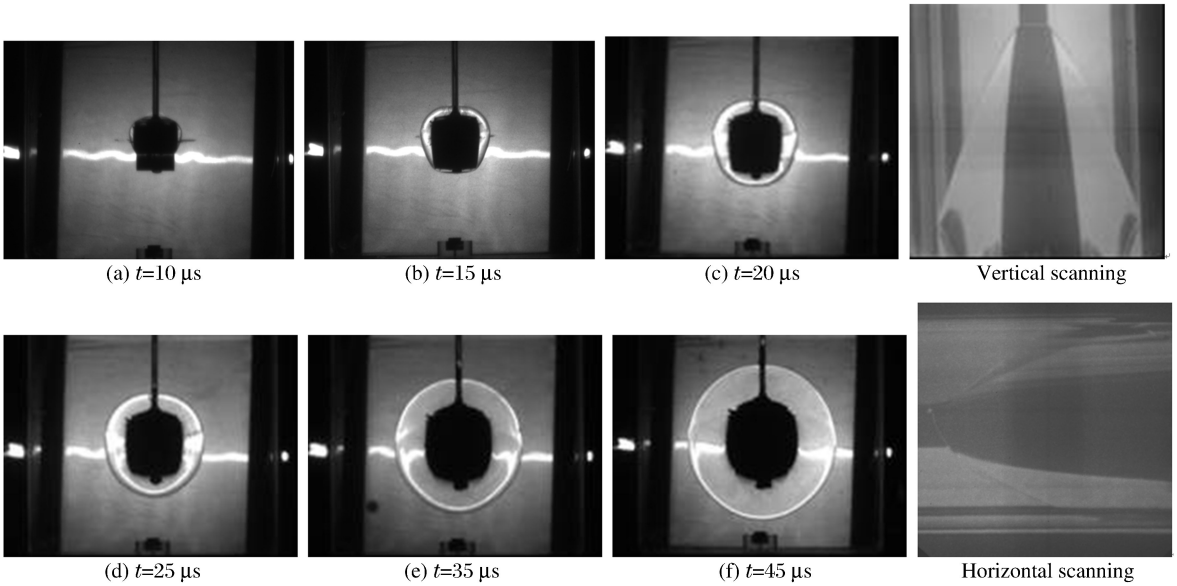


图 3　炸药水中爆炸冲击波传播一维和二维图像

Fig. 3　1D and 2D images of underwater-explosion shock wave

图 4 是对拍摄到的图像进行处理及数据分析，得到的炸药水中爆炸冲击波阵面轴向、径向随时间的变化曲线。图 4 中横坐标为相机的扫描时间，纵坐标为冲击波阵面距炸药中心的距离 H。从图 4(a)径向冲击波阵面随时间变化曲线可以看出，左、右边界整个传播过程中对称性很好，冲击波传播速度随时间的推延而逐渐减小。左边界冲击波在 5 μs 时刻传播速度约为 4.79 km/s，30 μs 时刻传播速度约为 3.01 km/s，67 μs 时刻传播速度约为 2.50 km/s。右边界冲击波在 5 μs 时刻传播速度约为 4.76 km/s，30 μs 时刻传播速度约为 3.00 km/s，67 μs 时刻传播速度约为 2.50 km/s。左、右边界平均速度几乎一样。从图 4(b)轴向冲击波随时间变化可以看出，冲击波传播速度轴向明显比径向快，上边界成像受电缆线影响无法准确读出，下边界 5 μs 时刻传播速度约为 5.47 km/s，30 μs 时刻传播速度约为 3.51 km/s，40 μs 时刻传播速度约为 3.06 km/s。

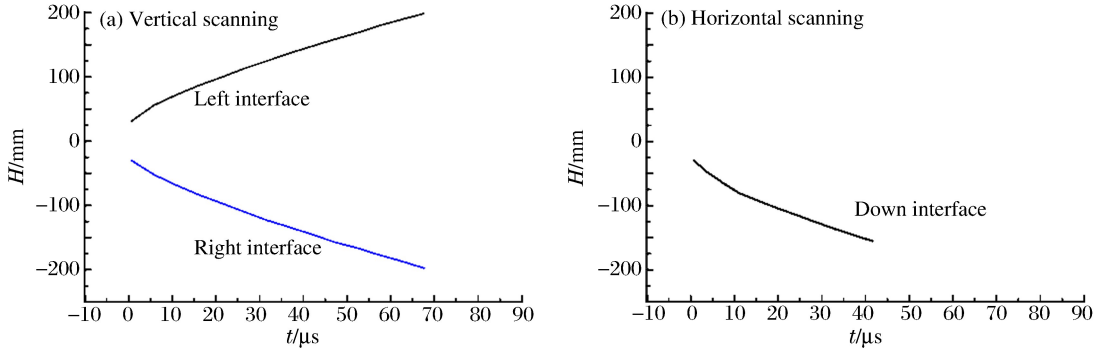


图 4　冲击波阵面变化曲线

Fig. 4　Curves of shock wave interface

图 5 为∅60 mm×66 mm 炸药在 800 mm×800 mm×800 mm 水箱中爆炸冲击波传播过程一维时间和二维空间信息图像。分幅成像拍摄条件：画幅数为 6，每幅时间间隔分别为 5、10、10、20、20 μs，曝光时间为 20 ns。扫描成像拍摄条件：扫描时间为 100 μs，扫描速度为 0.12 km/s，画幅数为 2，轴向 y 方向、径向 x 方向同时扫描。从 8 幅图像，可清楚地观察到炸药水中爆炸冲击波阵面传播整个过程，比炸药在 400 mm×400 mm×400 mm 水箱中冲击波传播速度慢。

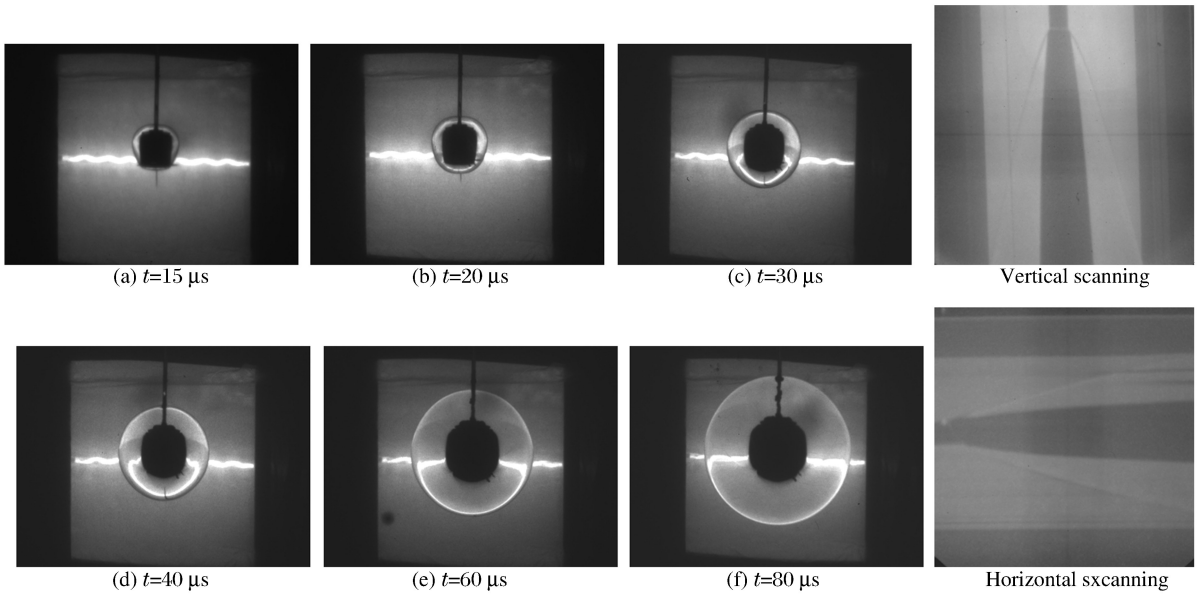


图 5 炸药水中爆炸冲击波传播一维和二维图像

Fig. 5 1D and 2D images of underwater-explosion shock wave

图 6 是对拍摄到的原始图 5 进行处理及数据分析，得到的炸药水中爆炸冲击波阵面轴向、径向随时间的变化曲线。图 6 中横坐标为相机的扫描时间，纵坐标为炸药水中爆炸冲击波阵面距中心的距离 H。从图 6(a)径向冲击波阵面随时间变化曲线可以看出，整个传播过程中对称性较好，冲击波传播速度随时间的推延而逐渐减小。左边界冲击波在 5 μs 时刻传播速度约为 4.56 km/s，30 μs 时刻传播速度约为 2.83 km/s，90 μs 时刻传播速度约为 2.23 km/s。右边界冲击波在 5 μs 时刻传播速度约为 4.41 km/s，30 μs 时刻传播速度约为 2.75 km/s，90 μs 时刻传播速度约为 2.21 km/s。左、右边界平均速度几乎一样。从图 6(b)轴向冲击波随时间变化可以看出，冲击波传播速度轴向明显比径向快，上边界成像受电缆线影响无法准确读出，下边界 5 μs 时刻传播速度约为 5.29 km/s，30 μs 时刻传播速度约为 3.18 km/s，40 μs 时刻传播速度约为 2.97 km/s。

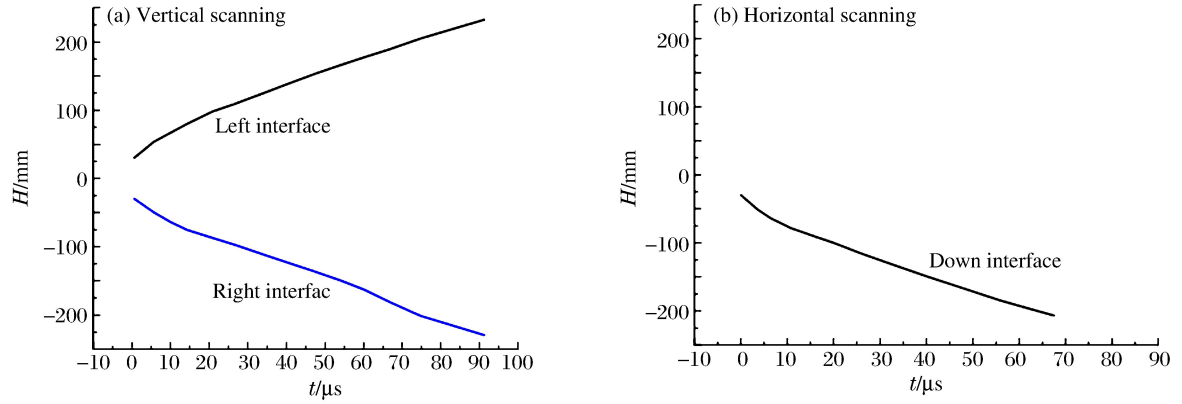


图 6 冲击波阵面变化曲线

Fig. 6 Curves of shock wave interface

由于相机水平扫描方向与药柱轴线重合，所以得到水平方向的冲击波速度可认为是波阵面上轴对称处的法向速度。通过法向速度和 Rankine-Hugoniot 关系[12]，可以得到冲击波阵面压力：

$$\begin{cases} p = \rho_0 u_s u_p \\ u_s = 1.483 + 25.306 \lg(1 + u_p/5.19) \end{cases} \tag{1}$$

式中：p 为冲击波阵面压力，GPa；ρ_0 为水的密度，g/cm^3；u_s 为冲击波速度，km/s；u_p 为冲击波后流场速度，km/s。

根据冲击波阵面随时间变化曲线（见图 4(b)和图 6(b)）可知任意时刻的波阵面的法向速度，由式(1)可得到不同时刻冲击波压力，冲击波压力随传播距离的变化曲线如图 7 所示。

图 7 中横坐标为冲击波阵面距炸药表面的距离 L，纵坐标为冲击波峰值压力 p。由图 7 可以看出，∅60 mm×66 mm 炸药在 400 mm×400 mm×400 mm 水箱中爆炸冲击波的传播过程中冲击波峰值压力保持着较快的衰减速率，在 800 mm×800 mm×800 mm 水箱中爆炸传播时，其冲击波峰值压力的衰减过程呈先急剧下降、后缓慢下降的趋势。

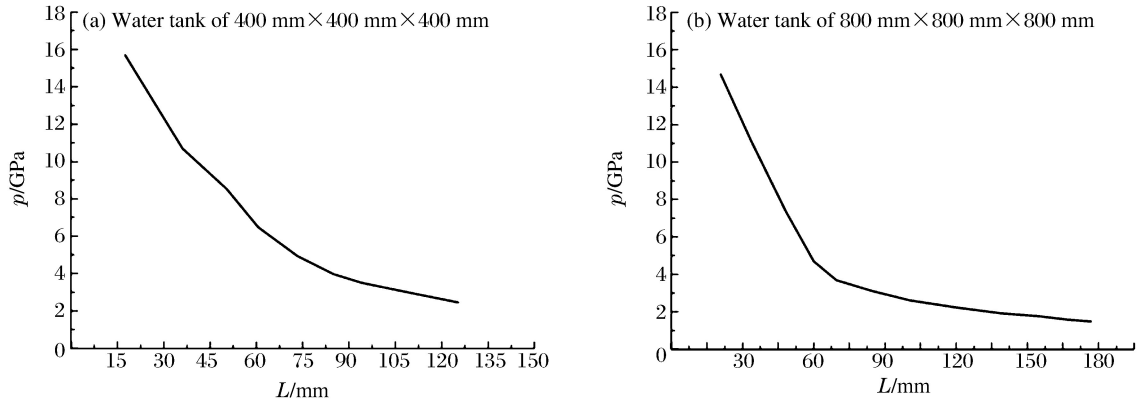


图 7　冲击波阵面压力变化曲线

Fig. 7　Pressure curves of shock wave interface

3　结　论

用超高速分幅摄影和扫描摄影技术拍摄到炸药水中爆炸冲击波传播过程同一时基、同一空基且具有高时空分辨的一维（水平和垂直同扫描）和二维图像。分幅摄影获得了不同时刻冲击波的波形，对于认识水下接触爆炸冲击波的发展演化过程具有重要意义，可以与数值模拟结果进行直接对比，检验数值模拟结果的准确性。扫描结果获得了轴向、径向冲击波的传播轨迹，得到炸药水下接触爆炸冲击波传播速度。分幅图像和扫描图像可以相互比对、相互校核，将二者在同一发实验中综合起来进行分析，避免了不同实验中分幅扫描数据分析中由于装置、测量仪器、安装、测试等系统误差带来的不确定性。同时分幅/扫描测试技术的发展丰富了水下接触爆炸冲击波的测试手段，为水下接触爆炸冲击波理论的研究和发展提供了较好的技术基础，该实验数据的获得对于水中兵器战斗部的设计及毁伤效能评估也有重要的参考价值。

参考文献：

[1]　李金河，赵继波，谭多望，等. 不同起爆方式对含铝炸药水中爆炸近场冲击波压力的影响[J]. 高压物理学报，2012，26(3)：289-293.
LI Jinhe，ZHAO Jibo，TAN Duowang，et al. Effect on the near field shock wave pressure of underwater explosion of aluminized explosive at different initiation modes[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2012，26(3)：289-293.

[2]　谭显祥. 高速摄影技术[M]. 北京：原子能出版社，1990.

[3]　谭显祥. 光学高速摄影测试技术[M]. 北京：科学出版社，1992.

[4]　DORSETT H，CLIFF M D. Detonation front curvature measurements and aquarium tests of tritonal varriants：DSTO-TR-1411[R]. Defence Science Technology Organisation，2003.

[5]　KIRA A，FUJITA M，ITOH S. Visualization of underwater explosion of spherical explosive[J]. Journal of Materials Processing Technology，1999，85(1)：52-55.

[6] ITO H S, SUZUKI O, NAGANO S, et al. Investigations on fundamental properties of underwater shock waves by high speed photography[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999,85(3):226-230.

[7] 赵继波,李金河,谭多望,等.柱形装药水中爆炸近场径向压力测试初探[C]//第五届全国爆炸力学学术会议论文集.2008:86-92.

[8] 赵继波,谭多望,李金河,等.TNT 药柱水中爆炸近场压力轴向衰减规律[J].爆炸与冲击,2008,28(6):539-543.
ZHAO Jibo, TAN Duowang, LI Jinhe, et al. Axial pressure damping of cylindrical TNT charges in the near underwater-explosion field[J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(6):539-543.

[9] 李金河,赵继波,谭多望,等.炸药水中爆炸的冲击波性能[J].爆炸与冲击, 2009,29(2):172-176.
LI Jinhe, ZHAO Jibo, TAN Duowang, et al. Underwater shock wave performances of explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2009,29(2):172-176.

[10] 畅里华,何徽,温伟峰,等.炸药柱面内爆磁通量压缩超高速同时分幅/扫描摄影技术[J].强激光与粒子束,2015,27(11):115002.
CHANG Lihua, HE Hui, WEN Weifeng, et al. Ultrahigh-speed simultaneous framing and streak photography of magnetic flux compression by explosive cylindrical implosion[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015,27(11):115002.

[11] 畅里华,汪伟,谷卓伟,等.柱面内爆磁通量压缩超高速摄影技术研究[J].光学学报,2015,35(10):1032001.
CHANG Lihua, WANG Wei, GU Zhuowei, et al. Study on magnetic flux compression by cylindrical implosion using ultrahigh-speed photography[J]. Acta Optica Sinica, 2015,35(10):1032001.

[12] 恽寿榕,赵衡阳.爆炸力学[M].北京:国防工业出版社,2005.

Study of underwater-explosion shock wave using ultrahigh-speed simultaneous framing and streak photography technology

CHANG Lihua, HE Hui, WEN Weifeng, LI Jinhe, WANG Xu, RAN Maojie

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: In this paper we investigated underwater-explosion shock wave propagation using the ultrahigh-speed simultaneous framing and streak photography, a system newly developed by ourselves. The results show that this system is able to record simultaneously the same spatiotemporal 1D and 2D high-resolution images of underwater explosion shock wave propagation and observe the underwater explosion shock wave propagation process of TNT with a diameter of 66mm and a length of 60 mm, and that the average propagation speed and pressure of the shock wave interface can be obtained based on the experiment, thereby providing reference for efficiency evaluation in the design of underwater weapons.

Keywords: explosive; underwater-explosion; ultrahigh-speed photography; simultaneous framing and streak scanning photoelectric camera

(责任编辑 丁 峰)