

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0201

炸药多点起爆超高速光电分幅摄影技术研究*

畅里华, 温伟峰, 冉茂杰, 黄文斌, 王旭, 何徽, 高鹏

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 为获得炸药多点起爆的爆轰波传播过程精细细节, 研究相适应的超高速光电分幅摄影技术, 采用自主研发的超高速光电分幅相机, 结合有机玻璃快门, 拍摄到以 HMX 和以 TATB 为基的塑料粘结炸药在三点同步起爆条件下纳秒时间分辨爆轰波发展高清晰序列图像, 成功观察到爆轰波的整个传播及相互作用过程, 捕获到内聚相互作用、马赫杆等波形细节结构。实验结果表明: 超高速光电分幅摄影技术基于独立曝光模式, 且具有曝光时间短、幅间隔连续可调、空间分辨高等优势, 可精细观察到爆轰波传播、相互作用细节信息, 该实验方法及其结果对于爆轰波相互作用及爆轰波马赫反射等问题研究具有一定的参考价值。

关键词: 超高速摄影; 塑料粘结炸药; 多点起爆; 爆轰波; 光电分幅相机

中图分类号: O384; O439

国标学科代码: 13035; 14030

文献标志码: A

Study on ultra-high speed photoelectric framing photography of the multi-point initiation of explosive

CHANG Lihua, WEN Weifeng, RAN Maojie, HUANG Wenbin, WANG Xu, HE Hui, GAO Peng

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

Abstract: In order to obtain the propagation process of detonation wave by multi-point initiation of explosive, a suitable ultra-high speed photoelectric framing photography technique was studied. A self-developed ultra-high speed photoelectric framing camera with an exposure time of 5 ns, spatial resolution of 40 lp/mm and photographic frequency of 200 MHz combined with plexiglass optical shutter technology was adopted. We obtained eight high-resolution detonation wave images of plastic bonded explosives based on HMX and TATB under the condition of three-point synchronous initiation. The whole process of the detonation wave propagation and interaction was captured successfully, and the details of the coherent interaction and the Mach Rod were observed. The experimental results show that the ultra-high speed photoelectric framing photography based on the independent exposure mode have the advantages of short exposure time, continuous adjustable image interval and high spatial resolution, and the propagation and interaction of the detonation wave can be observed in great detail. The experimental method and results provide a valuable reference for the study of the interaction and Mach reflection of the detonation waves.

Keywords: ultra-high speed photography; plastic bonded explosive; multi-point initiation; detonation wave; photoelectric framing camera.

近年来, 多点起爆技术(特别是冲击片雷管多点起爆技术)在定向杀伤、爆炸成型弹丸等类型的先进战斗部研制中获得了快速发展和应用^[1-2], 既大幅提升了战斗部的毁伤效能, 又赋予了战斗部多模毁伤的能力。随着现代战争的发展, 对武器系统的要求越来越高, 一方面要求实现可靠高效的毁伤, 另一方面要求具备较高安全性。因此, 钝感弹药及相关技术成为先进武器弹药研究的重要方向之一。对于钝感主装药, 一般无法通过火工品(如电爆炸丝雷管等)直接起爆, 通常需要借助尺寸相对较大且相对较为敏感的传爆药实现主装药的可靠起爆。为进一步提升传爆序列的安全性, Cope^[3]提出了取消大尺寸传爆

* 收稿日期: 2021-05-20; 修回日期: 2021-09-17

基金项目: 中国工程物理研究院重大项目(TA020303)

第一作者: 畅里华(1974—), 女, 学士, 高级工程师, clhwdd@163.com

通信作者: 黄文斌(1979—), 男, 硕士, 副研究员, caephwb@163.com

药, 采用冲击片雷管多点同步起爆, 利用冲击波和爆轰波对碰增压效应, 使钝感主装药中局部入射冲击波压力超过临界起爆压力, 实现钝感主装药的可靠起爆。

在多点起爆实验中, 对炸药多点起爆爆轰波发展及爆轰波相互作用过程的研究, 高速摄影为光学诊断技术中一个不可或缺的手段^[4-5]。目前高速摄影接收系统采用的相机通常为数码相机、转镜式高速相机及弹道靶场相机(SVR)^[6]。数码相机最高摄影频率为 0.1 MHz 量级, 转镜式高速分幅相机最高摄影频率为千万幅频, 曝光时间最短百纳秒, 动态模糊大。SVR 相机曝光时间最短几十纳秒, 能将不同时刻飞行物(或界面)的运动图像叠加到同一画面上, 但图像噪声大, 空间分辨率低。

本文采用中国工程物理研究院流体物理研究所研制的曝光时间最短 5 ns, 空间分辨率为 40 lp/mm、摄影频率为 200 MHz 的超高速光电分幅相机, 结合有机玻璃快门技术, 对以 HMX 为基及以 TATB 为基的两种塑料粘结炸药在三点同步起爆条件下爆轰波发展及相互作用波形, 进行纳秒量级时间分辨水平的捕捉, 并对实验结果进行初步分析。

1 实验装置

炸药三点起爆实验装置示意图如图 1 所示。采用 3 个电爆炸丝雷管串联的方式, 同时引爆 3 个均布的尺寸为 $\varnothing 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的太安传爆药柱, 再由传爆药柱起爆尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 HMX 塑料粘结主炸药或尺寸为 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的 TATB 塑料粘结主炸药, 在主炸药药柱的底面采用一定厚度的有机玻璃快门来截止后续产物发光, 在雷管底部安装一对电离式铜箔电探针, 用于触发超高速光电分幅相机。起爆点的具体分布如图 2 所示, 3 个起爆点均匀分布在 $\varnothing 50 \text{ mm}$ 的圆上, 主炸药药柱底面波阵面以起爆轴向为中心沿径向传播, 并采用超高速光电分幅相机拍摄波阵面传播过程。

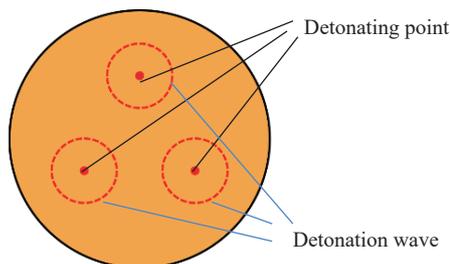


图 1 三点起爆装置示意图

Fig. 1 Schematic of the three-point detonating device

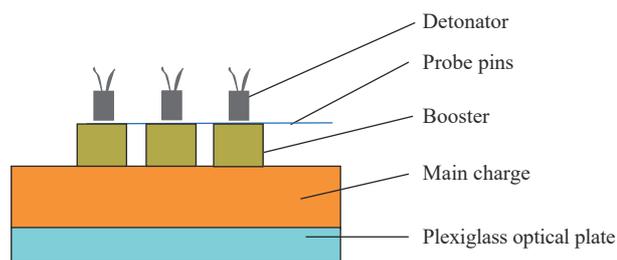


图 2 起爆点分布

Fig. 2 Distribution of detonation points

2 摄影系统诊断方案

2.1 摄影系统布局

图 3 为多点起爆实验中超高速光电分幅摄影诊断布局。为保证安全, 防止爆炸损坏爆炸塔窗口、镜头及相机等设备, 实验装置与相机成 90° 角摆放, 被摄目标通过反射镜折转后经防护窗口、成像物镜成像在超高速光电分幅相机像面上。由于爆轰波传播过程极快, 实验过程中, 为拍摄到稳定可靠的爆轰波发展过程图像, 必须保证超高速相机系统拍摄时刻与爆轰波的形成和发展时刻精确同步。同时超高速光电相机对光的敏感度较高, 炸药爆轰所产生的光较强, 实验时可通过每幅调节增益、曝光时间及采用滤光片等措施来降低光强, 防止图像曝光过度。

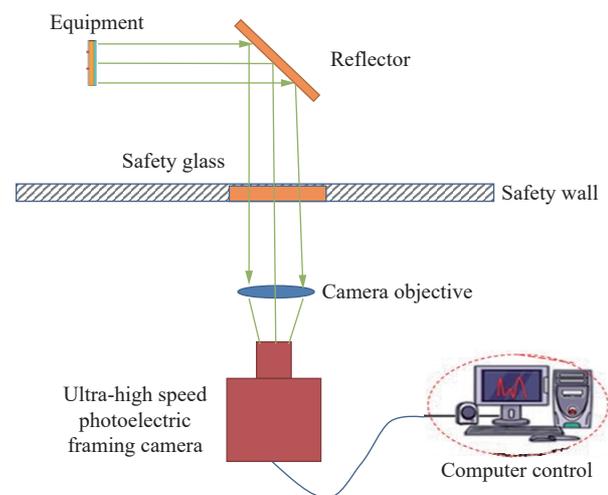


图 3 超高速光电分幅摄影系统布局

Fig. 3 Layout of the ultra-high speed photoelectric framing photography system

2.2 图像接收系统—超高速光电分幅相机

实验图像接收系统采用中国工程物理研究院流体物理研究所自主研发的超高速光电分幅相机, 该相机具有时间/空间分辨率高、画幅尺寸大以及摄影频率高、弱光探测能力强等优点, 已成为超快过程重要测试手段之一。其原理是通过成像与分光系统将拍摄的目标成像在门控像增强器的光阴极上, 像增强器的输出图像由 CCD 接收和记录, 系统曝光时间和摄影频率由像增强器驱动源以及精密同步模块控制, 外形见图 4。主要技术指标如下:

- (1) 记录画幅数为 8;
- (2) 最高摄影频率为 2×10^8 Hz;
- (3) 最短曝光时间为 5 ns;
- (4) 曝光时间范围为 5 ns~1 ms 连续可调;
- (5) 幅间隔为 1 ns~10 ms 连续可调;
- (6) 空间分辨率为 40 lp/mm;
- (7) 探测光谱范围为 380~860 nm。

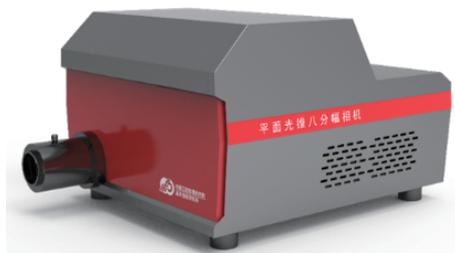


图 4 超高速光电相机外形

Fig. 4 Outline of ultra-high speed photoelectric framing camera

2.3 摄影系统同步控制设计

动态应用实验过程中, 由于起爆装置有高电压和大电流, 这些因素可能会导致超高速光电分幅相机误触发, 引起相机工作不正常或图像丢失等。为避免该问题, 确保系统可靠、稳定工作, 动态实验时, 相机用 UPS 电源供电, 相机、同步机触发全采用光触发模式, 相机与计算机之间的控制和数据接口全部采用光纤传输, 相机拍摄过程中同时反馈电信号到监控示波器, 精确监测相机第一幅的拍摄时刻, 确保相机在预期时刻进行曝光, 也方便在时序出现问题时进行排查。通过以上措施, 实现了目标起爆时刻与摄影系统拍摄时刻的精确同步^[7-8], 可靠地获得炸药三点起爆出药柱底面的爆轰波发展波形及相互作用波形高清晰度图像。超高速摄影测试系统同步控制设计如图 5 所示, 延时总控系统分两路, 一路给示波器作为时序监测 t_0 时刻参考信号, 另一路触发起爆装置, 装置起爆后输出电探针信号。电探针信号分为两路, 一路给示波器作为时序监测 t_1 时刻, 一路给延时同步机, 同步机进行延时后输出电信号, 经电-光转换器输出光信号, 通过光纤传输触发光电分幅相机, 同时光电分幅相机反馈第一幅记录时刻 t_2 给示波器, 实时监测相机实际记录时刻。

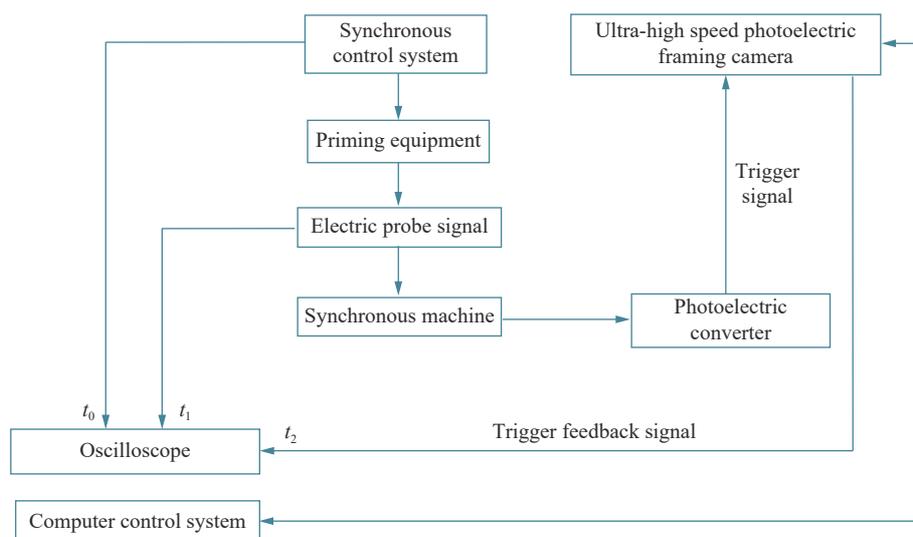


图 5 超高速光电摄影系统同步控制示意图

Fig. 5 Synchronization control diagram of ultra-high speed photoelectric photography

3 结果及分析

针对以 HMX 为基和以 TATB 为基的两种塑料粘结炸药三点同步起爆实验, 采用超高速光电分幅摄影系统开展了爆轰波传播过程实验研究, 实现了目标在像面上清晰成像以及被摄目标与相机拍摄时刻的精确同步, 获得爆轰波发展波形及相互作用波形 8 个时刻的高清晰度图像, 精细观察到波形的发展情况及相互作用过程, 拍摄结果如图 6 和图 7 所示。拍摄条件为: 曝光时间 10 ns, 增益 70%。定义雷管起爆时刻为零时。

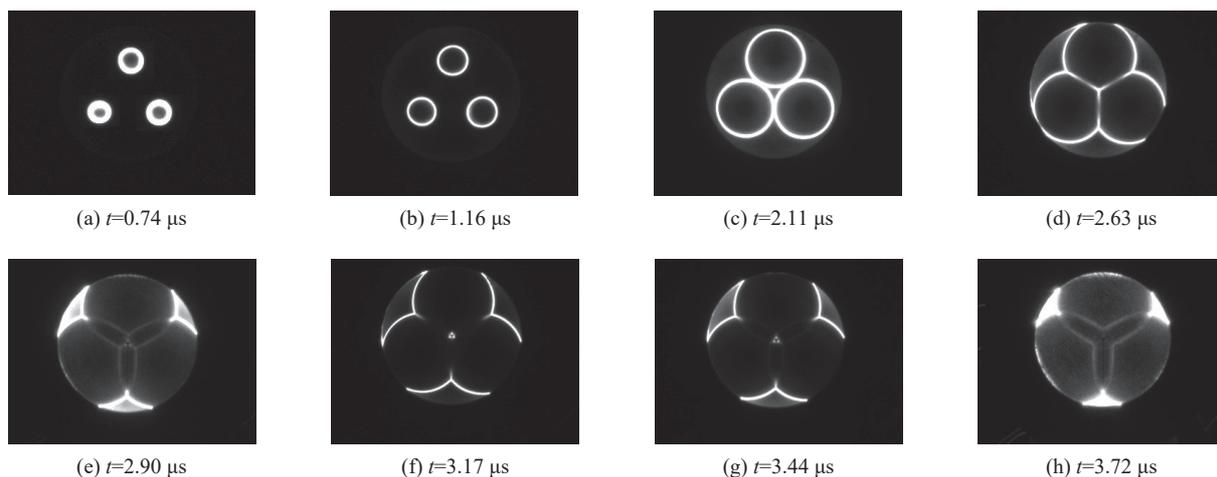


图 6 HMX 塑料粘结炸药三点起爆爆轰波传播过程图像

Fig. 6 Three-point initiation detonation wave propagation image of HMX-based plastic-bonded explosive

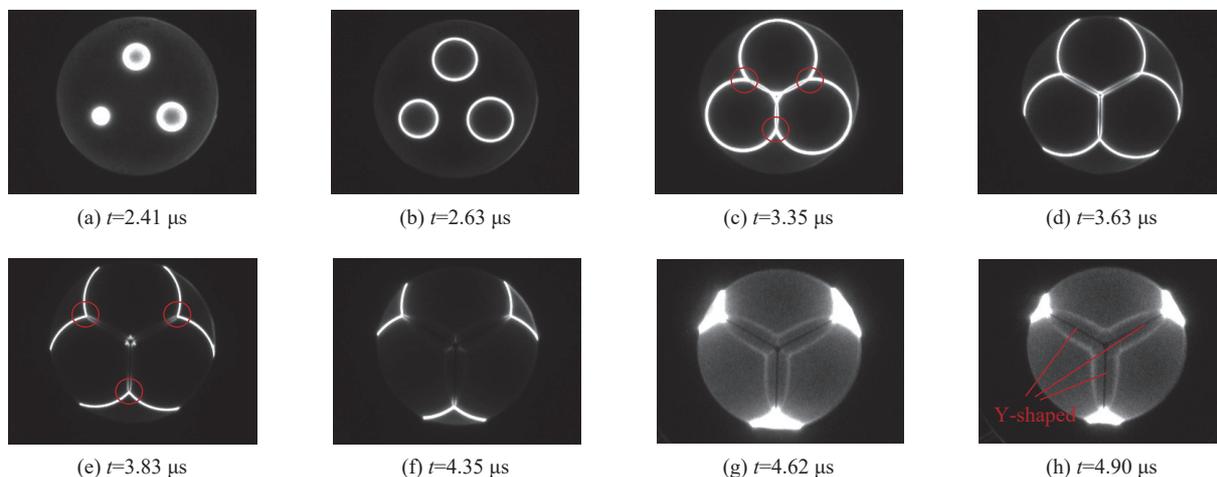


图 7 TATB 塑料粘结炸药三点起爆爆轰波传播过程图像

Fig. 7 Three-point initiation detonation wave propagation image of TATB-based plastic-bonded explosive

从图 6 和图 7 拍摄结果可以看出, 两发实验的第一幅图像均显示出药柱底部三个爆轰波光带直径有所差异, 这是由于同批次电爆炸丝雷管作用时间自身存在数十纳秒分散性所引起的。另外, 早期时刻图像的光带比后面几个时刻光带要宽一些。这是因本实验中主炸药内部形成的是球面散心爆轰波, 实验样品为等高度柱形炸药且起爆点位于药柱顶面, 爆轰波刚出炸药底面时, 波阵面的径向速度远大于正

常爆速, 随着波阵面向外运动, 径向传播速度逐渐降, 低直至接近正常爆速, 在相同曝光时间内波阵面沿径向运动的距离不完全相同, 导致不同时刻的波阵面光环宽度不一样。

同时从拍摄序列图像中也观察到爆轰波相互作用过程的一些重要信息, 三个起爆点发出的爆轰波首先两两发生正碰, 随后分别沿两个方向以斜入射的方式发生反射, 说明爆轰波相互作用有 2 种情况: (1) 沿炸药径向朝外传播的爆轰波相互作用, 从图 6 和图 7 的第 5 幅实验图像开始可以看出, 两条光带交汇并非像两个圆弧交汇那样形成尖点(例如图 6 和图 7 的第 3 幅实验图像), 而是形成了一定宽度的平坦区域, 说明两个相互作用的爆轰波已经产生了马赫反射, 随着入射角的增大, 马赫杆宽度逐渐增加; (2) 向炸药中心发展的爆轰波内聚相互作用, 汇聚过程的实验图像上未见形成马赫反射, 当爆轰波汇聚至炸药中心后, 反射冲击波向外传播过程中出现了马赫杆结构(图 6 和图 7 的第 4 幅实验图像开始), 表明发生了马赫反射, 同样随着入射角的增大, 马赫杆宽度不断增加。

另外, 从最后两个时刻实验图像中, 可以明显看出在有机玻璃光快门上形成了“Y”形状的黑线, 其位置对应于 3 个爆轰波两两相互作用交汇点形成的轨迹, 黑色表明其透光率极低, 分析认为可能是由于爆轰波在此区域相互作用导致加载压力突增、有机玻璃密度陡增所引起的, 是爆轰波对碰增压效应的一种体现。

如图 8 所示, 与国外基于重复曝光方式的 SVR 相机拍摄结果(典型实验图像见图 8(a)^[9])相比, 本文超高速光电分幅摄影系统(图 8(b)~8(d))由于每幅均采用独立曝光, 同时超高速光电分幅摄影系统摄影频率最高达 200 MHz, 最短曝光时间达 5 ns, 可有效减小运动模糊, 能够更精细地观测到爆轰波传播及相互作用细节信息, 如内聚相互作用、马赫杆等。

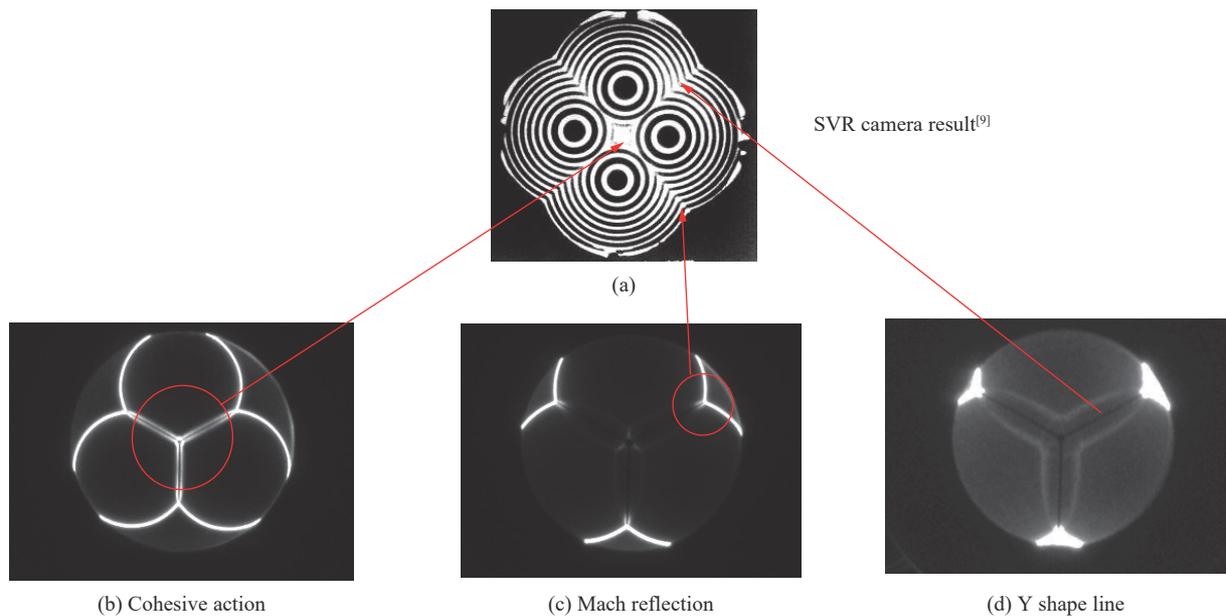


图 8 超高速光电分幅相机与 SVR 相机拍摄结果对比

Fig. 8 Result comparison of ultra-high speed photoelectric framing and SVR camera

4 结 论

超高速光电分幅摄影技术基于独立曝光模式, 且具有曝光时间短、幅间隔连续可调、空间分辨高等优势。通过本次实验研究, 采用超高速光电分幅摄影结合有机玻璃光快门技术, 拍摄到两种典型炸药在三点同步起爆条件下纳秒时间分辨的爆轰波发展及其相互作用波形序列图像, 清晰捕获到内聚相互作用、马赫杆等波形的细节结构。该实验方法及其结果对于爆轰波相互作用及爆轰波马赫反射等问题研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 秦国圣, 李博, 褚恩义, 等. 冲击片雷管多点起爆技术的发展与应用 [C]// 中国兵工学会第十七届引信学术年会, 2011: 400–404.
- [2] 黄文斌, 文尚刚, 谭多望, 等. 在球面散心冲击波作用下 JB-9014 炸药冲击引爆过程实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(4): 373–376. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)04-0373-04.
HUANG W B, WEN S G, TAN D W, et al. Experimental study on shock initiation process of JB-9014 under loading conditions of divergent spherical shock wave [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(4): 373–376. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)04-0373-04.
- [3] COPE P. US navy overview [C]// Associate Depc. Head for Energetics. NDIA'S 53rd Annual Fuze Conference, 2009.
- [4] 谭显祥, 韩立石. 高速摄影技术 [M]. 北京: 原子能出版社, 1990.
- [5] 谭显祥. 光学高速摄影测试技术 [M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [6] 文尚刚, 赵锋, 孙承伟. 钝感炸药 JB9014 的多点起爆实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2003, 17(3): 193–198. DOI: 10.11858/gywlb.2003.03.006.
WEN S G, ZHAO F, SUN C W. Experimental studies on the Multi-Point Initiation of the insensitive explosive JB9014 [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2003, 17(3): 193–198. DOI: 10.11858/gywlb.2003.03.006.
- [7] 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. DOI: 10.11884/HPLPB201527.115002.
CHANG L H, HE H, WEN W F, 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. DOI: 10.11884/HPLPB201527.115002.
- [8] 畅里华, 何徽, 温伟峰, 等. 炸药水中爆炸冲击波超高速同时分幅/扫描摄影技术 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 437–442. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0241.
CHANG L H, HE H, WEN W F, et al. Study of underwater-explosion shock wave using ultrahigh-speed simultaneous framing and streak photography technology [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 437–442. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0241.
- [9] 文尚刚, 赵锋, 孙承伟, 等. 用 SVR 相机进行多点起爆实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2001, 21(3): 233–236.
WEN S G, ZHAO F, SUN C W, et al. Multi-points initiation experiment studies with a SVR camera [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(3): 233–236.

(责任编辑 王小飞)