

文章编号: 1006-9941(2015)11-1041-05

# 复合装药偏心起爆条件下波形扫描实验研究

王辉, 沈飞, 田清政, 任新联, 袁建飞

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 采用正交多狭缝扫描技术对复合装药在偏心起爆条件下爆轰波形进行测量。通过分析两个互相垂直方向上的五狭缝扫描迹线的几何关系, 获得了爆轰波在狭缝交点处的传播速度及方向, 并结合定向汇聚爆轰波传播过程图, 分析了其爆轰波的传播特性。结果表明, 受内、外层装药爆速差的影响, 爆轰波在传播过程中呈弧形状向内收敛, 最终形成喇叭形波形, 且沿中心线的爆速提高了约  $1.67 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。

**关键词:** 偏心起爆; 爆轰波; 复合装药; 正交多狭缝扫描

**中图分类号:** TJ55; O389

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.001

## 1 引言

偏心起爆式定向战斗部是一种新型高效毁伤战斗部技术, 主要通过多分位可控起爆在装药中形成定向汇聚爆轰波, 从而实现对破片速度、飞散方向和密度的控制。由于该技术具有能量利用率高、毁伤威力大、易于工程化等特点, 从而引起国内外学者的广泛关注<sup>[1-6]</sup>。近年来, 在定向战斗部设计中逐渐采用复合装药以进一步优化爆轰波形并提高装药的能量利用率<sup>[7]</sup>, 但由于偏心起爆条件下爆轰波在传播过程中会产生各种汇聚、绕射等复杂现象, 导致其波形的扫描难度较高, 且目前这方面的研究成果也较少, 使得复合装药在该类战斗部的应用中缺乏相应的设计依据。

目前对炸药爆轰波传播过程的分析研究, 通常采用平行多狭缝或交叉条纹板技术测量炸药端面爆轰波形, 获得其对称二维平面上波形的传播过程。如袁宝慧<sup>[8]</sup>、丁刚<sup>[9]</sup>采用平行三狭缝扫描技术分别对两点偏心起爆的圆柱形 B 炸药及复合装药端面爆轰波形进行了测量, 得到了在狭缝方向上爆轰波的传播轨迹, 并绘制出了观测方向上不同时刻的波形图, 但该技术只能获得爆轰波在一维方向上的相位移及相速度, 无法获得爆轰波的传播速度及方向。Held<sup>[10]</sup>利用转镜式条纹相机及交叉型多条纹遮光板技术对不同配方的复

合装药端面爆轰波形进行测量, 由于测量得到的多条纹轨迹在试验底片上相互交叉重叠, 对试验数据的真实判读有较大难度。因此, 对于复合装药偏心起爆条件下较为复杂的爆轰波形, 采用以上两种扫描技术均难以全面观测出爆轰波的传播特性及波形变化规律。

鉴于此, 本研究尝试采用正交多狭缝扫描技术对偏心起爆条件下复合装药端面波形进行测量, 即采用两台高速扫描相机在相互垂直的方向上同时进行多狭缝扫描, 分别得到正交两个方向上的扫描轨迹, 通过几何关系分析狭缝交点处的爆轰波传播速度及方向, 从而全面、准确地了解其爆轰波在此平面上的传播过程, 为该类战斗部的装药结构设计提供依据。

## 2 实验

### 2.1 试样准备

复合装药由内外两层不同配方的炸药组成, 外层为高爆速炸药 A (HMX/黏结剂质量比为 95/5), 采用压装成型, 尺寸为外径  $\Phi 100 \text{ mm}$ , 内径  $\Phi 65 \text{ mm}$ , 厚度  $20 \text{ mm}$ , 密度  $1.81 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 内层为低爆速炸药 B (TNT/RDX/Al/黏结剂质量比为 40/30/20/10), 采用铸装成型, 尺寸为  $\Phi 65 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 密度为  $1.78 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ; 采用国军标 GJB772-1997 方法 702.1 测量炸药 A、B 的爆速分别为  $8700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $7200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。为了更接近战斗部装药结构设计, 装药结构中心设有  $\Phi 20 \text{ mm}$  中心孔, 其装药结构如图 1 所示。

### 2.2 实验装置及布局

实验装置主要由主装药、起爆药、光探板、起爆点

收稿日期: 2015-02-17; 修回日期: 2015-04-06

基金项目: 国家重大基础科研专项(00402020202)

作者简介: 王辉(1977-), 男, 高级工程师, 主要从事炸药爆轰性能试验与理论研究。e-mail: land\_wind@163.com

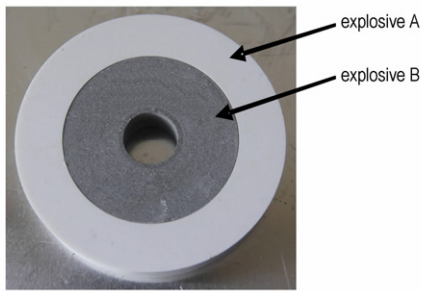


图1 复合装药结构图

Fig.1 Structure of composite charge

定位环、高压瞬发雷管组成。装配过程中,将主装药放置于定位环内,定位环上有两个  $\Phi 8$  mm 的小孔,其夹角为  $60^\circ$ ,孔内放置传爆药柱及雷管。采用 3 mm 厚有机玻璃作为光探板,其安装面与主装药的测量端面紧密贴合,在爆轰波形测量时光探板能起到了爆炸快门的作用,在试验底片上获得边界清晰的波形迹线。波形扫描实验装置及布局如图 2 所示,实验采用两台 SJZ-15 型转镜式高速相机在正交方向同时进行五狭缝扫描, I 号相机的狭缝对准装药的竖直方向,其狭缝编号为 1~5, II 号相机的狭缝对准装药的水平方向,其狭缝编号为 1'~5',狭缝的宽度均为 0.02 mm,相机的扫描速度均设置为  $6 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ,当相机均达到预定转速后两个起爆点同时起爆。

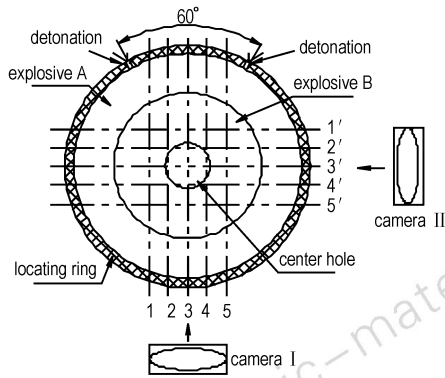


图2 波形扫描实验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental set-up for wave scanning

### 3 实验结果及分析

图 3 为复合装药偏心起爆条件下的正交多狭缝扫描实验底片。由于在装药中心部位设有  $\Phi 20$  mm 的中心孔,因此经过中心孔位置时狭缝所扫描爆轰波形

应是空缺的,但炸药爆轰产物在通过圆孔时发光并会产生光线的折射,底片中的对应位置会出现一些跳跃的杂光,判读时可以省略。对底片进行数字化判读后,结合狭缝的间距、相机扫描速度、图像放大比等参数,可得到实验波形的具体曲线值,令竖直方向为  $y$  轴,水平方向为  $x$  轴,则两个方向上测量得到的相位移随时间变化的波形曲线如图 4 所示。由于狭缝 1 和 5、2 和 4 所扫描的位置关于  $y$  轴对称,因此对应的扫描曲线重合。

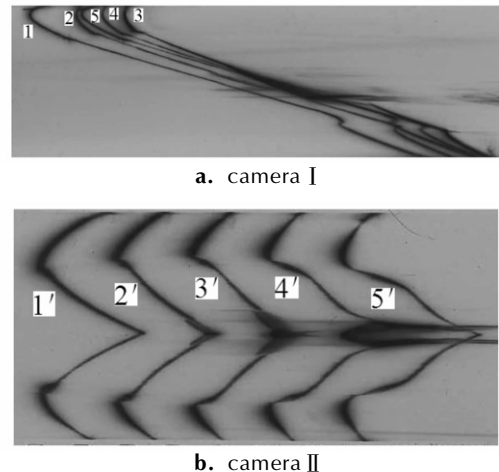
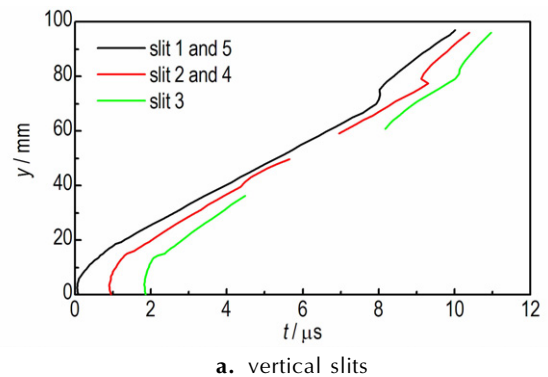
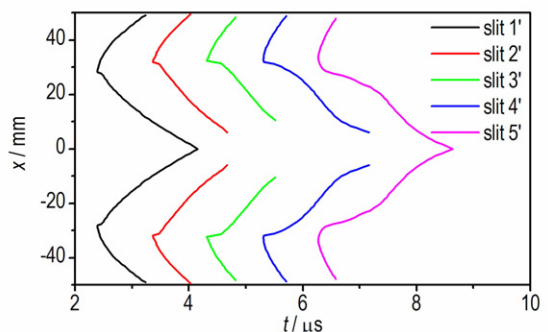


图3 两个相机的狭缝扫描底片

Fig.3 Negatives of slit scanning from two cameras



a. vertical slits



b. horizontal slits

图4 狭缝扫描波形曲线

Fig.4 Curves of slit scanning waveform

图 4 中所示的这些曲线只是描述了从不同方向观测的相位随时间的变化过程,并不表示爆轰波沿法线方向的传播轨迹。这些曲线在某个位置点的斜率表示该处的相速度,而在计算相速度的过程中,由于曲线的变化较大,简单地对曲线进行整体拟合,后对时间求导,会引入较大的误差,因此,可以结合该点附近的信息并采用差分法获得该点处的相速度。图 5 描述了竖向和水平向狭缝位置处的相速度随位移的变化曲线,其中,  $v_y$  为沿竖直狭缝观察的相速度,  $v_x$  为沿水平狭缝观察的相速度,图 5b 中由于横向狭缝的相速度峰值较大,所以纵坐标选用  $\lg(v_x)$ ,而  $v_x$  的单位仍为  $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。由于内外层装药的爆速差异较大,且狭缝方向并不是爆轰波真实的传播方向,所以图 5 中的速度曲线在内外层交界面出现大幅度的跳跃。

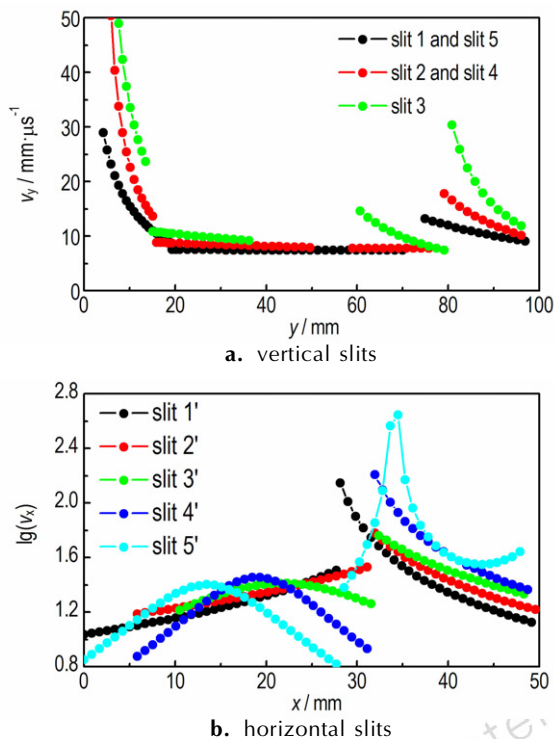


图 5 沿不同方向观测的相速度变化曲线  
Fig. 5 Curves of image velocity along orthogonal direction

由于爆轰波的法向传播速度与相速度存在图 6 所示的几何关系,其中,  $v_s$  为爆轰波阵面的法向速度,  $\theta$  为法向速度与  $y$  轴的夹角,根据其几何关系,可知

$$v_s = v_x \sin\theta \quad (1)$$

$$v_s = v_y \cos\theta \quad (2)$$

$$\theta = \arctan(v_y / v_x) \quad (3)$$

由公式(1)和(2),能得到如下公式

$$v_s = \frac{v_x \cdot v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \quad (4)$$

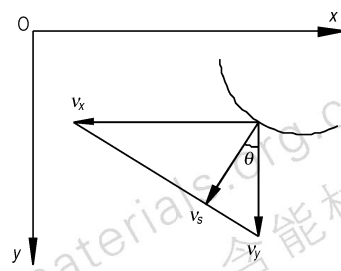


图 6 法向速度与相速度关系图  
Fig. 6 Relationship between normal velocity and image velocity

本研究采用正交 5 狭缝扫描技术,竖直狭缝与水平狭缝共有 25 个交点,但由于炸药试样设有中心孔,所以在炸药的端面共有 20 个有效测量交点,如图 7 所示。此外,由于各相交点分别关于  $y$  轴对称,则只需要计算其中对称轴一边交点的相关物理量。根据公式(3)和(4)可计算出爆轰波经过各个交点时的法向速度及方向,计算结果如表 1 所示,而对于对称轴上的交点( $j$ 点和  $k$ 点)位置处,则有  $v_s = v_y$  且  $\theta = 0$ 。

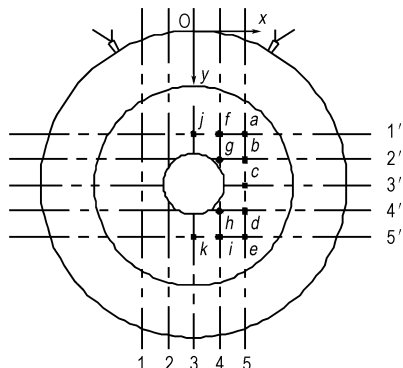


图 7 狭缝交点位置示意图  
Fig. 7 Joints of orthogonal slits

表 1 狭缝交点处的爆轰波参数

Table 1 Parameters of detonation wave at joints of orthogonal slits

No. coordinates	$v_x$ / $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$v_y$ / $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$v_s$ / $\text{mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$	$\theta$ / $(^\circ)$
a (16.8, 33.2)	18.189	7.465	6.906	22.3
b (16.8, 41.6)	20.141	7.441	6.980	20.3
c (16.8, 50.0)	23.176	7.417	7.064	17.8
d (16.8, 58.4)	26.387	7.394	7.119	15.7
e (16.8, 66.8)	21.857	7.37	6.984	18.6
f (8.4, 33.2)	13.627	8.323	7.103	31.4
g (8.4, 41.6)	16.274	8.116	7.263	26.5
h (8.4, 58.4)	10.119	7.824	6.190	37.7
i (8.4, 66.8)	18.434	7.818	7.197	23.0
j (0, 33.2)	-	9.380	9.380	0
k (0, 66.8)	-	11.051	11.051	0

为了较为直观地表示装药中爆轰波形的传播过程,采用垂直狭缝方向的扫描结果绘制出复合装药中定向汇聚爆轰波形传播过程,如图8所示。

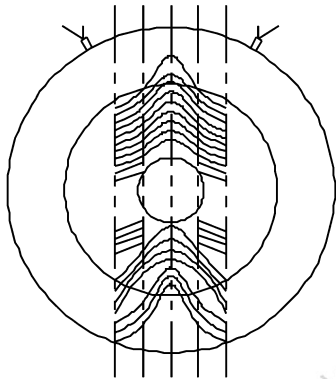


图8 竖直狭缝所得波形图

Fig.8 Detonation waveform from vertical slits

从图8中可以看出,起爆点对称轴两侧形成的球面爆轰波在靠近轴线位置处汇聚碰撞并形成一定曲率的马赫波,在绕过中心孔前,其波形曲率随着传播距离增大逐渐减小;通过中心孔后,爆轰波曲率突然增大,且在穿越内外层交界的过程中,内外层装药的爆速差导致爆轰波向中心呈弧形收敛趋势,最终形成喇叭形波形。从图8中只能看出爆轰波在垂直方向上的传播及变化趋势,结合表1所列交点处的爆轰波参数可具体分析爆轰波的传播速度及变化过程。例如,爆轰波在绕过中心孔前,爆轰波在经a点到b时(图7),法向速度与y轴的夹角 $\theta$ 仅减小了 $2^\circ$ ;而在靠近中心位置由f点到g点时, $\theta$ 角则减少约 $5^\circ$ ;说明在此过程中波形中心处 $\theta$ 角比边缘处变化较大,使得爆轰波形曲率逐渐变小。在 $g \rightarrow h \rightarrow i$ 的过程中, $\theta$ 角先增大 $11.2^\circ$ 又减少 $14.7^\circ$ ,法向速度则先减少 $1.07 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 又增加 $1 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ,说明当通过中心孔时爆轰波经过绕射后传播速度明显衰减,但由于波形向中心汇聚,造成传播速度又迅速增大;在e点处,由于受外层装药影响, $\theta$ 角相对于d点处增大了 $3^\circ$ ,使得爆轰波形进一步向内收敛,同时k点的马赫波速度进一步提高,比j点高出 $1.67 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。当装药对称中心部位马赫波速度提高的同时其压力相应增大,对破片的驱动能力也相应提高,因此在定向战斗部设计中可充分利用复合装药优化调整爆轰波形来提高定向杀伤破片的驱动速度。

## 4 结论

(1)采用正交多狭缝扫描技术对复合装药偏心起

爆条件下的爆轰波形传播过程测量,能够量化得到狭缝交点处的爆轰波传播速度及方向,便于深入分析其爆轰波的传播特性及变化规律。

(2)复合装药结构能够优化调整爆轰波形,尤其是爆轰波跨越中心孔后,其波形进一步向对称中心线收敛,偏转角增大了约 $3^\circ$ ,使得沿中心线的爆速提高了约 $1.67 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ,从而提高了汇聚的能量及对破片的驱动能力。

## 参考文献:

- [1] 叶小军, 韩玉, 陈庆宝. 偏心起爆战斗部速度增益的数值模拟及实验[J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 29-34.  
YE Xiao-jun, HAN Yu, CHEN Qing-bao. Numerical simulation and experiment of velocity gains on the non-central detonation warhead[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(3): 29-34.
- [2] 梁争峰, 袁宝慧, 孙兴昀, 等. 定向战斗部破片能量增益的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2005, 28(2): 52-55.  
LIANG Zheng-feng, YUAN Bao-hui, SUN Xing-yun, et al. Numerical simulation on the kinetic energy increase of aimed warhead[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(2): 52-55.
- [3] 兰志, 杨亚冬, 韩玉. 起爆方式对偏心式定向战斗部破片速度分布的影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(3): 159-161.  
LAN Zhi, YANG Ya-dong, HAN Yu. Research on the distribution of fragment velocity of a eccentric initiation warhead by initiation mode[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(3): 159-161.
- [4] 朱绪强, 黄川, 李艳春, 等. 偏心起爆定向战斗部威力研究[J]. 含能材料, 2014, 22(1): 89-93.  
ZHU Xu-qiang, HUANG Chuan, LI Yan-chun, et al. Lethality investigation of azimuthal warhead[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(1): 89-93.
- [5] 屈明, 钱立新, 杨云斌. 起爆方式对战斗部破片定向性能影响的数值模拟研究[J]. 含能材料, 2005, 13(3): 137-140.  
QU Ming, QIAN Li-xin, YANG Yun-bin. Numerical simulation of effect of initiation position on directed performance of warhead fragment[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(3): 137-140.
- [6] 黄静, 孔凡勋, 袁晋, 等. 多点偏心起爆对破片速度增益的影响[J]. 现代防御技术, 2011, 39(6): 37-42.  
HUANG Jing, KONG Fan-xun, YUAN Jin, et al. Influence of multi-spots off-axis initiation on fragment velocity gain[J]. *Modern Defence Technology*, 2011, 39(6): 37-42.
- [7] 王晓峰, 郝仲璋. 炸药发展中的新技术[J]. 火炸药学报, 2002, 25(4): 35-38.  
WANG Xiao-feng, HAO Zhong-zhang. New development of explosives technology[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25(4): 35-38.
- [8] 袁宝慧, 杨凯. 多狭缝扫描技术在偏心起爆定向战斗部实验的应用研究[C]//2007年战斗部与毁伤效率专业委员会第十届学术年会论文集. 西安: 西安近代化学研究所, 2007: 553-556.  
YUAN Bao-hui, YANG Kai. Application research of multi-slit scan in asymmetrical initiated direct warhead[C]//The 10th Annual Meeting Symposia of Warhead and Damage Efficiency.

- Xi'an: Xi'an Modern Chemistry Research Institute, 2007: 553–556.
- [9] 丁刚, 袁宝慧. 复合装药偏心起爆的爆轰波特性[J]. 火炸药学报, 2009, 32(1): 79–82.
- DING Gang, YUAN Bao-hui. Detonation wave characteristics of dual explosive under asymmetrical initiation[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(1): 79–82.
- [10] Manfred H. Detonation behaviour of adjacent high explosive charges with different detonation velocities[C]// The 34th International Annual conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 2003.

## Wave Scanning Experiment of Composite Charge under Eccentric Initiation

WANG Hui, SHEN Fei, TIAN Qing-zheng, REN Xin-lian, YUAN Jian-fei

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

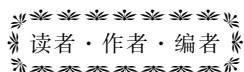
**Abstract:** In order to study the detonation wave propagation characteristics of composite charge under eccentric initiation, the detonation wave was measured by the orthogonal multi-slit scanning technology. By analyzing geometric relation of multi-slits scanning traces from two mutually perpendicular directions, the detonation wave propagation velocity and direction at the intersection of multi-slits were obtained. Moreover, combined with the propagation process map of directional convergent detonation wave, the propagation characteristic of detonation wave was investigated. Results show that because of the difference between inner and outer charging detonation velocity, the detonation wave propagation is in an arc shape in the process of convergence inside, then forms a horn shaped wave, and the detonation velocity along the centerline increases by about  $1.67 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ .

**Key words:** eccentric initiation; detonation wave; composite charge; orthogonal multi-slit scan

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.11.001



## 《含能材料》“观点”征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了“观点”栏目。“观点”栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式上短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简介及主要研究工作介绍。

## 《含能材料》损伤与点火专栏征稿

含能材料的损伤特征与点火过程有密切的联系,炸药、推进剂的内部损伤及其对力学特性、安全特性和点火行为的影响规律受到了含能材料学界的高度重视,为推动这一重要研究方向的学术交流,本刊特设立“损伤与点火”专栏。专栏主要征集炸药、推进剂等含能材料的损伤观测与多尺度表征技术、含损伤的本构方程、准静态与动态损伤演化规律、损伤与破坏的宏(细)观模式、损伤对起爆、爆炸、爆轰成长以及非冲击起爆行为的影响等方向的原创性研究论文。来稿请注明“损伤与点火”专栏。

《含能材料》编辑部