DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)02-0285-04

激光驱动复合飞片冲击起爆 HNS-Ⅳ实验研究*

陈少杰,吴立志,沈瑞琪,叶迎华,胡 艳
(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 激光驱动飞片冲击起爆技术具有很强的抗电磁干扰能力和可以直接起爆钝感炸药等优点,能够满足现代战场对火工系统的高安全性和高可靠性要求。HNS-Ⅳ是最适合激光驱动飞片冲击起爆技术的药剂。本文中在 6 种不同激光能量下,测试了 Al/Al_2O_3/Al 复合飞片和 Al 单层飞片对 HNS-Ⅳ药剂(装药密度为 1.5 g/cm^3)的冲击起爆情况。实验实现了激光驱动飞片对 HNS-Ⅳ的成功起爆。在 217~245 mJ 激光能量范围内,激光驱动 Al/Al_2O_3/Al 复合飞片均可成功完全起爆 HNS-Ⅳ药柱。Al 单层飞片均未成功起爆 HNS-Ⅳ药柱。飞片冲击压力对激光驱动飞片冲击起爆 HNS-Ⅳ起决定作用。

关键词: 爆炸力学;冲击起爆;激光驱动飞片;HNS-Ⅳ;Al/Al_2O_3/Al
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

激光驱动飞片冲击起爆技术就是利用激光驱动产生的高速飞片冲击起爆高能炸药的过程。激光驱动飞片冲击起爆技术具有很强的抗电磁干扰能力和可以起爆钝感炸药等优点,能够满足现代战场对起爆系统的安全性和可靠性要求。在所有直列式传爆序列规定的许用炸药中,HNS 药剂在撞击感度低时,其冲击波感度却较高。因此,它是激光驱动飞片冲击起爆技术最适合的药剂。

激光驱动飞片冲击起爆技术最早出现在 20 世纪 70 年代。已经比较系统地研究了激光驱动飞片冲击起爆技术,并且利用激光飞片成功起爆了 PETN、HNS 等炸药,对冲击起爆的过程和机理也有了比较深入的了解[1-5]。D. L. Paisley [1]利用激光驱动厚度 2 μm,速度 1 800 m/s 的 Al 飞片起爆了密度 1.55 g/cm^3和 1.6 g/cm^3 的超细 HNS。S. Watson 等[2]发现利用调 Q 的 Nd:YAG 激光器驱动厚度 3~5 μm,速度 4~6 km/s 的 Al 飞片可以很容易起爆超细的 PETN,对常规的 PETN 则较难起爆。M. W. Greenaway 等[3]和 M. D. Bowden 等[4-5]在研究激光驱动金属飞片冲击起爆 HNS 和 PETN 药剂时,也有同样的发现,对于超细晶体(亚微米)的药剂很容易起爆,对于常规粒度的药剂则很难起爆。Sun Cheng-wei 等[6]、谷卓伟等[7]利用 205 mJ 脉冲激光驱动厚度为 5.5 μm 的 Al 飞片冲击起爆了密度为 1.2 g/cm^3的细颗粒压装 PETN 炸药。吴立志[8]利用 5 种飞片分别对 PETN 和 HNS 等 2 种炸药进行冲击起爆,结果只有部分 PETN 成功起爆,HNS 均未起爆。

本文中在利用 Al 飞片冲击起爆 HNS-Ⅳ的研究基础上[8],将 Al 单层飞片中加入 Al_2O_3 隔热层,制备 Al/Al_2O_3/Al 复合飞片,实验对比了 Al/Al_2O_3/Al 复合飞片和 Al 单层飞片对 HNS-Ⅳ药剂的冲击起爆情况,分析飞片冲击压力对激光驱动飞片冲击起爆 HNS-Ⅳ的影响。

1 实验装置与方法

实验装置如图 1 所示,激光经过聚焦入射到 K9 玻璃与飞片靶界面处,烧蚀 Al 层生成高温高压等离子体,使剩余部分沿加速膛剪切下来,并被高速驱动出去,形成飞片。飞片撞击到 HNS-Ⅳ药柱,使 HNS-Ⅳ起爆。实验中,激光器为调 Q 的 Nd:YAG 固体脉冲激光器,波长为 1 064 nm,脉宽为 6.5 ns,最大输出激光能量为 350 mJ。HNS-Ⅳ(粒度 D_{50} = 1 196.6 nm)的装药直径为 2 mm,装药高度为

* **收稿日期**: 2013-10-30; **修回日期**: 2014-02-14
基金项目: 国家自然科学基金项目(11202105)
第一作者: 陈少杰(1987—),男,博士研究生; **通讯作者**:吴立志,wulizhi82@163.com。

5 mm,装药密度为 1.5 g/cm^3,药筒材料为不锈钢。药柱后面固定一块铅靶,对起爆效果进行评判。选用的加速膛材质为 T10 钢,尺寸为∅1.0 mm×0.6 mm。飞片为 Al/Al_2O_3/Al 复合飞片和 Al 单层飞片,厚度分别为 0.5、1.0、5.0 和 6.8 μm,利用真空磁控溅射技术在 K9 玻璃上沉积制备。共测试了 147、175、202、217、231 和 245 mJ 等 6 种激光能量下 2 种飞片对 HNS-Ⅳ的冲击起爆情况。

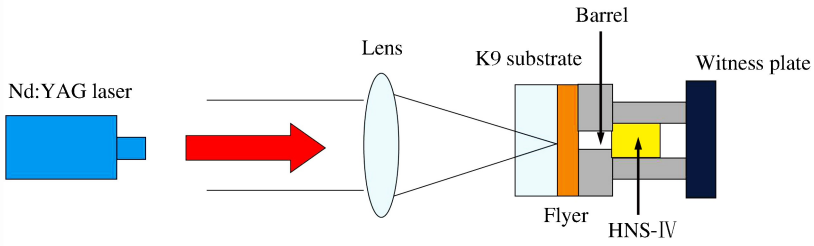

图 1 激光驱动飞片冲击起爆实验装置图

Fig. 1 Schematic of shock initiation by laser-driven flyer

2 实验结果与分析

2.1 飞片冲击起爆实验结果

不同激光能量下,激光驱动 Al/Al_2O_3/Al 复合飞片和 Al 单层飞片冲击起爆 HNS-Ⅳ结果如表 1~2 所示。表中飞片速度利用多普勒测速仪(PDV)测得。

表 1 Al 单层飞片冲击起爆结果

Table 1 Initiation results of laser-driven single flyers

发次	E/mJ	v/(m·s^{-1})	起爆结果
1	147	3 312	否
2	175	3 996	否
3	202	4 238	否
4	217	4 480	否
5	231	4 865	否
6	245	5 128	否

表 2 Al/Al_2O_3/Al 复合飞片冲击起爆结果

Table 2 Initiation results of laser-driven composite flyers

发次	E/mJ	v/(m·s^{-1})	起爆结果
1	147	3 148	否
2	175	3 754	否
3	202	4 117	否
4	217	4 359	是
5	231	4 602	是
6	245	4 844	是

从表 1 中可以看出:在 6 种激光能量下,激光驱动 Al 单层飞片,均未实现 HNS-Ⅳ药柱的成功起爆。从表 2 中可以看出:激光能量高于 217 mJ 时,HNS-Ⅳ药剂可以被 Al/Al_2O_3/Al 复合飞片成功起爆。实验后的药柱和药壳的照片如图 2 所示。从图中可以看出:未成功起爆的药柱(图片中的上面一排):随着激光能量的增大,药柱的烧蚀效果增加。成功起爆后的药壳明显外扩(图片中的下面一排),内径由原来的 2 mm,增大到2.7 mm;外径由原来的 6 mm,增大到 6.4 mm。HNS-Ⅳ药柱成功起爆后,在铅靶上留下一个直径为 3.6 mm、深度为 6 mm 的圆坑,如图 3 所示,实现了 HNS-Ⅳ成功完全起爆。

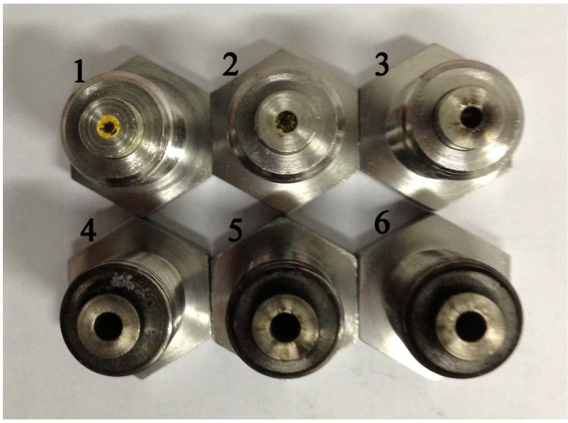

图 2 复合飞片冲击起爆实验后的药柱和药筒

Fig. 2 The explosive and cartridge after the multi-layer flyer shock initiation



图 3 成功起爆后的铅靶

Fig. 3 The crater impacted by laser-driven flyer initiation

2.2 飞片冲击起爆结果分析

对比 2 种飞片的冲击起爆结果可知：$Al/Al_2O_3/Al$ 复合飞片能够实现 HNS-Ⅳ的成功起爆，而 Al 单层飞片无法成功起爆 HNS-Ⅳ。根据非均相炸药的冲击起爆判据[9]：

$$E_c = p^2\tau \tag{1}$$

式中：p 为进入炸药的冲击波压力，τ 为飞片中冲击波来回传播的时间。飞片冲击炸药时的 $p^2\tau$ 值大于炸药的冲击起爆阈值 E_c 时，才可以实现对炸药的冲击起爆。τ 主要由飞片的厚度和飞片材料的声速共同决定。本实验中，2 种飞片厚度相当，飞片材料以 Al 为主，因此 τ 的影响可以忽略。在先前的研究过程中发现：Al_2O_3 隔热层的加入，虽然降低了飞片的速度，但是却大大提高了飞片的冲击压力[10]。以 $Al/Al_2O_3/Al$ 复合飞片的冲击压力 p_m 为 Al 单层飞片的冲击压力 p_s 的 2 倍为例，则 $Al/Al_2O_3/Al$ 复合飞片的 $p^2\tau$ 值 4 倍于 Al 单层飞片。因此，在同等实验条件下，$Al/Al_2O_3/Al$ 复合飞片能够实现 HNS-Ⅳ的成功起爆，而 Al 单层飞片则不能。由此可知，在激光驱动飞片冲击起爆技术中，追求飞片的高速度并不是炸药成功起爆的关键。通过改变飞片的结构和材料，提高飞片的冲击压力，才是实现炸药冲击起爆的根本。

3 结　论

在单层 Al 飞片的基础上加入 Al_2O_3 隔热层，用磁控溅射沉积制备了 $Al/Al_2O_3/Al$ 复合飞片。利用激光驱动 $Al/Al_2O_3/Al$ 复合飞片和 Al 单层飞片冲击起爆装药密度为 1.5 g/cm^3 的 HNS-Ⅳ药剂。测试了不同激光能量下 2 种飞片对 HNS-Ⅳ的冲击起爆。实验实现了激光驱动 $Al/Al_2O_3/Al$ 复合飞片对 HNS-Ⅳ药剂的成功起爆，Al 单层飞片在 6 种激光能量下均未成功起爆 HNS-Ⅳ。对比 2 种飞片的性能与起爆结果，分析得知：要实现激光驱动飞片对炸药的冲击起爆，飞片冲击压力的大小起决定性作用。如何通过改变飞片的结构和材料，提高飞片的冲击压力，将是今后研究的重点。

参考文献：

[1] Paisley D L. Laser-driven miniature flyer plates for shock initiation of secondary explosives[C]// Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Albuquerque, 1989.

[2] Watson S, Gifford M J, Field J E. The initiation of fine grain pentaerythritol tetranitrate by laser-driven flyer plates [J]. Journal of Appled Physics, 2000, 88(1): 65-69.

[3] Greenaway M W, Gifford M J, Proud W G, et al. An investigation into the initiation of hexanitrostilbene by laser-

driven flyer plates[C]// AIP Conference Proceedings. Atlanta, 2002,620(1):1035-1038.
[4] Bowden M D, Maisey M P, et al. The initiation of fine particle hexanitrostilbene using laser-driven flyer plates[C]// Proceedings of the 13th International Detonation Symposium. Norfolk, 2006.
[5] Bowden M D, Drake R C. The initiation of high surface area pentaerythritol tetranitrate using fiber-coupled laser-driven flyer plates[C]// Proceedings of SPIE. San Diego, 2007.
[6] Sun Cheng-wei, Wu Chun-yan, Yuan Yong-hua, et. al. Shock initiation of explosives impacted by laser-driven flyers[C]// Proceedings of the 26th International Pyrotechnics Seminar. Nanjing, 1999.
[7] 谷卓伟,孙承纬,苏小勇.小型激光器驱动飞片冲击引爆炸药实验研究[J].爆炸与冲击,2002,22(1):88-91.
Gu Zhuo-wei, Sun Cheng-wei, Su Xiao-yong. Experimental research on impacting and detonating explosive by mini size laser-driven-flyer[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(1):88-91.
[8] 吴立志.激光驱动金属飞片冲击起爆技术研究[D].南京:南京理工大学,2010.
[9] Walker F E, Wasley R J. Critical energy for shock initiation of heterogeneous explosives[J]. Explosive Stoff, 1969,17(1):9.
[10] Chen Shao-jie, Wu Li-zhi, Shen Rui-qi, et al. Laser driven performance of Al/Al_2O_3/Al multi-layer flyer[J]. Laser Physics, 2013,23(12):125002.

Initiation of HNS-Ⅳ using a laser-driven multi-layer flyer*

Chen Shao-jie, Wu Li-zhi, Shen Rui-qi, Ye Ying-hua, Hu Yan
(*School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: Detonators based on laser-driven flyers are less vulnerable to the strong electromagnetic interference and can use insensitive secondary explosives as initial explosives. Additionally, this technology has advantages in terms of improved flexibility and reliability. Hexanitrostilbene (HNS-Ⅳ) is the ideal candidate for use in laser-driven flyer initiation. Experiments were carried out to study the initiation of HNS-Ⅳ with the density of 1.5 g/cm^3, by using laser-driven Al/Al_2O_3/Al multi-layer flyers and Al single-layer flyer at different laser energies. Within 217-245 mJ laser energies, the HNS-Ⅳ can be successfully detonated by Al/Al_2O_3/Al multi-layer flyers, while not be detonated by Al single-layer flyers under the above laser energies.

Key words: mechanics of explosion; shock initiation; laser-driven flyer; HNS-Ⅳ; Al/Al_2O_3/Al
(责任编辑 王易难)