

文章编号: 1003-1480 (2022) 04-0007-04

B/KNO₃激光感度和点火延迟时间试验研究

湛 赞¹, 薛太旭¹, 杨立欣², 蒋超达¹, 王 宇¹, 王玉强¹, 严 楠³(1. 西安航天动力技术研究所, 陕西 西安, 710025; 2. 北京空间机电研究所, 北京, 100094; 3. 北京理工大学
爆炸科学重点实验室, 北京, 100081)

摘 要: 为对比 3 种配方的 B/KNO₃ 的激光点火性能, 搭建激光点火系统进行了 B/KNO₃ 激光感度和点火延迟时间试验研究。结果表明: $w_B : w_{KNO_3} : w_{\text{粘合剂}} = 23.7 : 70.7 : 5.6$ 、 $w_B : w_{KNO_3} = 33 : 67$ 和 $w_B : w_{KNO_3} = 15 : 85$ 的 B/KNO₃ 的 50% 发火功率分别为 198mW、181mW 和 288mW, 标准偏差分别为 29.42、48.53 和 78.77; 点火延迟时间分别为 2.85ms、4.38ms 和 37.20ms, 标准偏差分别为 0.59、1.13 和 17.51。 $w_B : w_{KNO_3} : w_{\text{粘合剂}} = 23.7 : 70.7 : 5.6$ 的 B/KNO₃ 最适合作为激光点火药剂, $w_B : w_{KNO_3} = 33 : 67$ 的 B/KNO₃ 较适合, 而 $w_B : w_{KNO_3} = 15 : 85$ 的 B/KNO₃ 不适合作为激光点火药剂。

关键词: 火工品; B/KNO₃; 激光点火; 感度; 点火延迟时间**中图分类号:** TJ450.3+2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2022.04.002

Experimental Research on Laser Sensitivity and Ignition Delay Time of B/KNO₃

ZHAN Zan¹, XUE Tai-xu¹, YANG Li-xin², JIANG Chao-da¹, WANG Yu¹, WANG Yu-qiang¹, YAN Nan³

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Technique Institute, Xi'an, 710025; 2. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing, 100094; 3. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: In order to compare the laser ignition performance of 3 formulations of B/KNO₃, a laser ignition system was built and the experiments on B/KNO₃ laser sensitivity and ignition delay time were carried out. The results show that for B/KNO₃ formulations of $w_B : w_{KNO_3} : w_{\text{binder}} = 23.7 : 70.7 : 5.6$, $w_B : w_{KNO_3} = 33 : 67$ and $w_B : w_{KNO_3} = 15 : 85$, the 50% firing power is 198mW, 181mW and 288mW, and the standard deviation is 29.42, 48.53 and 78.77 respectively, the ignition delay time is 2.85ms, 4.38ms and 37.20ms, and the standard deviation is 0.59, 1.13 and 17.51 respectively. The study indicates the formulation of $w_B : w_{KNO_3} : w_{\text{binder}} = 23.7 : 70.7 : 5.6$ is the most suitable for laser ignition; the formulation of $w_B : w_{KNO_3} = 33 : 67$ is suitable, while the formulation of $w_B : w_{KNO_3} = 15 : 85$ is not suitable for laser ignition.

Key words: Initiating explosive device; B/KNO₃; Laser ignition; Sensitivity; Ignition delay time

激光点火系统以光纤作为传输介质, 不仅不会受到诸如静电、电磁辐射等外界干扰的影响, 而且可以实现药剂和电器元件的隔离, 此外, 激光器的高能量输出可以实现钝感药剂的可靠点火, 特别适用于现代战场的复杂电磁环境^[1-4]。在航天工程中, 激光火工品^[5]因可以实现光路在线自检、有效提高系统的安全性

和可靠性, 并且能量转换效率高, 受到越来越多的关注。目前, 适用于激光点火的药剂有 B/KNO₃、Zr/KClO₄等^[6-7], 关于 B/KNO₃ 激光点火性能的研究^[8-12]已成为热点。激光点火感度和点火延迟时间是 2 个重要参数, 本文针对常用的 3 种配方的 B/KNO₃ 点火药剂, 开展了激光感度和点火延迟时间试验研究。

收稿日期: 2022-03-26**作者简介:** 湛赞 (1995-), 男, 工程师, 从事固体火箭发动机激光点火技术研究。

1 激光点火系统的搭建

激光点火系统主要由激光二极管驱动电源、二极管激光器、光纤及光纤连接器、接触式激光点火器等组成。激光器在驱动电源电流激励下产生激光,通过光纤传输到点火器引燃装药。

1.1 激光二极管驱动电源

采用实验室自行研制的激光二极管驱动电源为激光器提供电流输入,如图 1 所示,该电源可通过调节电流强度和脉宽来控制输出激光的功率和脉宽。为便于测量激光点火延迟时间,在输出激光的同时,驱动电源输出一个测试用同步触发信号。驱动电源电流强度调节范围为 0~2.5A,脉宽调节范围为 0~100ms,能够满足激光器输出激光及点火试验需求。

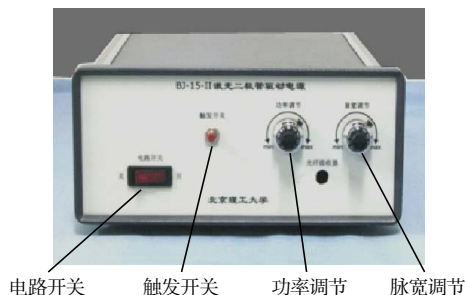


图 1 激光二极管驱动电源

Fig.1 Laser diode drive power

1.2 二极管激光器

二极管激光器输出激光波长为 980nm、功率为 1.5W,带尾纤输出便于连接点火器,如图 2 所示。



图 2 二极管激光器

Fig.2 Laser diode physical map

1.3 接触式激光点火器

光纤直接接触式激光点火器由光纤塞、点火药、管壳、铝盖片、105/125μm 光纤(一端有 FC 光纤接头)组成,其结构图和实物图分别如图 3~4 所示。本设计结构简单、装药方便、成本低、激光感度一致性

好,适用于大量感度和点火时间试验。

根据调研可知,常用的 B/KNO₃ 点火药剂有 2 种配方,分别为 $w_B : w_{KNO_3} : w_{\text{粘合剂}} = 23.7 : 70.7 : 5.6$,以及 $w_B : w_{KNO_3} = 15 : 85$ 。此外,北京理工大学张慧卿^[13]研究发现 $w_B : w_{KNO_3}$ 为 33 : 67 时,药剂的激光感度最高。本研究采用这 3 种配比的 B/KNO₃ 为装药进行激光点火试验,装药量为 45mg,压药压力为 30MPa。其中, B/KNO₃ 均为粉末状,硼粉平均粒度不大于 1.5μm;硝酸钾为 GB/T 647,分析纯;粘合剂由 98% 的不饱和聚酯树脂、1.5%过氧化甲乙酮、0.5%环烷酸钴组成。

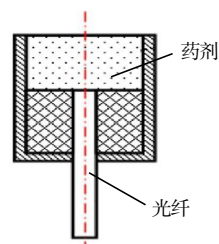


图 3 光纤直接接触式点火器结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of the optical fiber direct contact igniter structure



图 4 光纤直接接触式点火器实物图

Fig.4 Photo of optical fiber direct contact igniter

2 B/KNO₃ 激光点火感度

激光点火感度是表征含能材料激光点火临界能量特性的重要参数,可以由达到药剂临界发火刺激所需的激光能量来衡量。激光感度常用 50%发火可靠度的激光功率表示,其测试原理如图 5 所示。

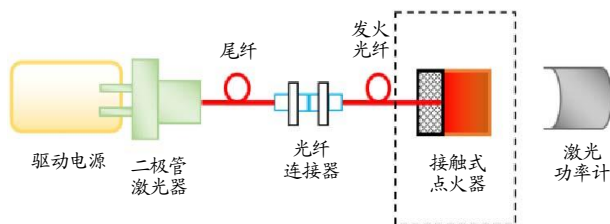


图 5 激光感度测试原理图

Fig.5 Schematic diagram of laser sensitivity test

试验步骤:

(1) 将激光功率计接入光路中(图 5 虚线框内)。调节驱动电源的电流,测量二极管激光器输出的光功率,得到一组至少 6 个驱动电流——激光功率数据点,进行电流——功率的标定曲线拟合。

(2) 将激光功率计移除,并将接触式激光点火器接入光路中,进行激光点火感度试验。本试验采用陕西应用物理化学研究所开发的 D 最优感度试验方法进行感度测定和数据处理,试验样本量为 16 发。

(3) 计算出阈值电流后,代入电流——功率标定曲线关系式,得到点火所需的激光功率阈值。已知光纤芯径为 105/125 μm ,可进一步计算得到激光功率密度阈值。

3 种配比的 B/KNO₃ 感度试验结果如表 1 所示。

表 1 B/KNO₃ 激光感度测试结果

Tab.1 Laser sensitivity test results of the B/KNO₃

序号	配方	50%发火 功率/mW	标准 偏差	99.9%发 火功率 /mW	0.1%发火 功率 /mW
1	W _B :W _{KNO₃} :W _{黏剂} =23.7:70.7:5.6	198	29.42	289	107
2	W _B :W _{KNO₃} =15:85	288	78.77	532	45
3	W _B :W _{KNO₃} =33:67	181	48.53	331	31

由表 1 可知,3 号配方 B/KNO₃ 的 50%发火功率最小;1 号配方 B/KNO₃ 的 99.9%发火功率最小;而 2 号配方 B/KNO₃ 的 50%发火功率和 99.9%发火功率均最大,因此激光感度最小。在激光点火稳定性上,1 号配方 B/KNO₃ 标准偏差最小,稳定性最好;2 号配方 B/KNO₃ 标准偏差最大,发火最不稳定。综上所述,1 号和 3 号配方 B/KNO₃ 的激光点火感度较高,且相对于 3 号配方,1 号配方 B/KNO₃ 激光点火稳定性更好。

此外,由配比分析可知:随着硼粉含量增加,B/KNO₃ 的激光点火感度逐渐增加。分析认为 B/KNO₃ 点火过程主要是硝酸钾分解产生氧气,氧气和硼粉进一步燃烧。当硼粉含量过低时,硼粉不足以与氧气进行自持燃烧,此时增加硼粉含量能够提高 B/KNO₃ 的激光感度。但 3 号配方和 1 号配方 B/KNO₃ 激光感度差别不大,说明增加硼粉含量对提高激光点火感度存在一个限值,达到限值后,再增加硼粉含量对激光点火感度的影响不大。这是因为此时硼粉含量足够,但硝酸钾分解产生的氧气不够,因此不能够通过增加硼

粉含量来提高 B/KNO₃ 的激光感度。

3 B/KNO₃ 激光点火延迟时间

本研究激光点火延迟时间定义为从激光作用药剂开始到光电探测器接收到点火器输出火焰的时间。点火延迟时间试验系统由驱动电源、激光器、光纤、接触式激光点火器、光电探测器和示波器组成,如图 6 所示。试验原理为:驱动电源给激光器输入电流的同时,输出同步触发信号给示波器(第 1 靶信号),激光器输出激光通过光纤传递给激光点火器,引燃点火器装药,装药燃烧输出火焰,光电探测器接收火焰的光信号、转换为电信号并传输至示波器(第 2 靶信号),将两靶信号的时间差作为激光点火延迟时间。设置激光器输出激光功率为 1.5W、脉宽为 100ms,试验结果如表 2 所示。

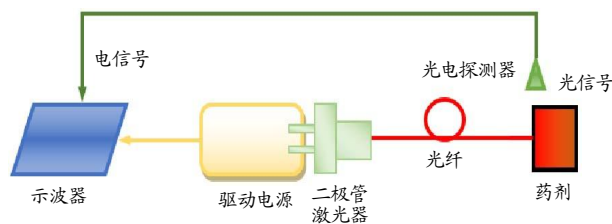


图 6 激光点火延迟时间测试原理图

Fig.6 Schematic diagram of laser ignition delay time test

表 2 B/KNO₃ 点火延迟时间测试结果

Tab.2 Ignition delay time test results of B/KNO₃

序号	药剂类型	试验 数量	点火延迟 时间均值/ms	标准 偏差
1	W _B :W _{KNO₃} :W _{黏剂} =23.7:70.7:5.6	5	2.85	0.59
2	W _B :W _{KNO₃} =15:85	5	37.20	17.51
3	W _B :W _{KNO₃} =33:67	5	4.38	1.13

由表 2 可知,1 号配方 B/KNO₃ 的点火延迟时间最短、标准偏差最小,表明点火一致性最好,适合作为理想的激光点火药剂。3 号配方 B/KNO₃ 的点火延迟时间较短、标准偏差较小,点火一致性较好,可以作为备选的激光点火药剂。2 号配方 B/KNO₃ 的点火延迟时间最长且标准偏差最大,点火一致性最差,在 3 种配比的药剂中最不适合作为激光点火药剂。

此外,由配比分析可知粘合剂的增加可以降低 B/KNO₃ 的激光点火延迟时间。分析原因是由于适量的粘合剂能够增加 B/KNO₃ 药剂颗粒之间的粘结力,

防止药剂在激光点火过程中飞散开,从而防止激光能量的散失。因此,在相同时间内药剂吸收激光能量更多,从而能够更快点燃。

4 结论

本研究针对3种配比的B/KNO₃的激光点火感度和点火延迟时间进行试验测试,得到以下结论:

(1) 配方为 $w_B : w_{KNO_3} : w_{\text{粘合剂}} = 23.7 : 70.7 : 5.6$ 的B/KNO₃激光点火感度较高(50%发火功率为198mW)且发火稳定性最好(标准偏差为29.42),其点火延迟时间最短(2.85ms)且点火一致性最好(标准偏差为0.59),最适合作为激光点火药剂。

(2) 配方为 $w_B : w_{KNO_3} = 33 : 67$ 的B/KNO₃激光点火感度最高(50%发火功率为181mW)且发火稳定性较好(标准偏差为48.53),其点火延迟时间较短(4.38ms)且点火一致性较好(标准偏差为1.13),较适合作为激光点火药剂。

(3) 配方为 $w_B : w_{KNO_3} = 15 : 85$ 的B/KNO₃激光点火感度最低(50%发火功率为288mW)且发火稳定性最差(标准偏差为78.77),其点火延迟时间最长(37.20ms)且点火一致性最差(标准偏差为17.51),不适合作为激光点火药剂。

参考文献:

- [1] 张秋芳,黄强,梁月玫,等.固体火箭发动机激光点火装置研究[J].火炸药学报,2001(1): 13-16.
- [2] 湛赞,严楠,李朝振.光窗式激光点火器耐压性能及输出威力试验研究[J].弹箭与制导学报,2019(5): 67-69.
- [3] 湛赞,梁晓爱,严楠,等. B/KNO₃激光点火内弹道仿真研究[J].弹箭与制导学报,2020(1): 78-80.
- [4] 曾雅琴,严楠,魏继锋,等.激光二极管点火系统研究进展[J].光学技术,2008(S1): 302-304.
- [5] 湛赞,严楠,李朝振,等.双光纤自聚焦透镜组件设计及光路仿真[J].兵器装备工程学报,2019,40(8): 203-206.
- [6] 严楠,曾雅琴,魏继锋,等. B/KNO₃装药密度对激光点火延迟时间的影响[J].应用激光,2009(1): 50-53.
- [7] 严楠,曾雅琴,傅宏. Zr/KClO₄激光点火延迟时间与装药密度的关系[J].含能材料,2008(5): 487-489.
- [8] 郭伟,曹金乐,常仕民,等.基于新型半导体激光系统的B/KNO₃/PF点火特性[J].含能材料,2020,28(2): 89-98.
- [9] 袁新烈,宋克超,张若天,等.飞秒激光加工B/KNO₃点火药及其热分析[J].光电子·激光,2017,28(12): 1378-1383.
- [10] 舒浪平,沈美,沈瑞琪,等.激光对B/KNO₃药剂作用现象的研究[J].火工品,2005(1): 22-24.
- [11] Sivan J, Haas Y, Grinstein D, et al. Boron particle size effect on B/KNO₃ ignition by a diode laser[J]. Combustion and Flame, 2015, 162(2): 516-527.
- [12] Sivan J, Haas Y. Laser ignition of various pyrotechnic mixtures—an experimental study[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2015, 40(5): 755-758.
- [13] 张慧卿. 二极管激光激励含能材料点火特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2002.

[1] 张秋芳,黄强,梁月玫,等.固体火箭发动机激光点火装置研究