

文章编号: 1003-1480 (2023) 01-0011-05

B/KNO₃激光点火器装药参数与点火性能研究

郭伟¹, 张志新², 王端¹, 郭晋³, 姬宇飞⁴, 郭宇轩¹

(1.中北大学 环境与安全工程学院, 山西 太原, 030051; 2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳, 712099; 3.西安机电信息技术研究所, 陕西 西安, 710065; 4. 山西潞安煤炭技术装备有限责任公司, 山西 长治, 046200)

摘要: 为了探索硼/硝酸钾 (B/KNO₃) 激光点火器的装药参数对其点火性能的影响, 设计了光窗式 B/KNO₃ 激光点火器并搭建了激光点火系统, 试验研究了硝酸钾粒径、硼与硝酸钾配比、添加粘结剂种类与质量分数、B/KNO₃ 装药密度及输入端密封性等因素对其发火功率和点火延迟时间的影响。结果表明: 硝酸钾粒径为 2~12 μm 、 $w_B : w_{\text{KNO}_3}$ 为 3 : 7、添加 3% 的酚醛树脂、装药密度为 1.6g·cm⁻³ 的 B/KNO₃ 激光点火器的点火性能最佳, 其发火功率和点火延迟时间分别为 4.52 W 和 160 ms; 对 B/KNO₃ 激光点火器进行密封设计可进一步增强其点火性能, 其发火功率和点火延迟时间分别为 4.24 W 和 120 ms。

关键词: 激光点火; 硼/硝酸钾; 装药参数; 光窗式点火器; 点火性能

中图分类号: TJ450.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.01.003

Study on Charge Parameters and Ignition Performance of B/KNO₃ Laser Igniter

GUO Wei¹, ZHANG Zhi-xin², WANG Duan¹, GUO Jin³, JI Yu-fei⁴, GUO Yu-xuan¹

(1. School of Environment and Safety Engineering, The North University of China, Taiyuan, 030051; 2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang, 712099; 3. Xi'an Institute of Mechanical and Electrical Information Technology, Xi'an, 710065; 4. Shanxi Lu'an Coal Technology and Equipment Co. Ltd., Changzhi, 046200)

Abstract: In order to explore the influence of charge parameters of B/KNO₃ laser igniter on its ignition performance, a light window B/KNO₃ laser igniter was designed and a laser ignition system was built. The effects of the particle size of potassium nitrate, the mass ratio of boron to potassium nitrate, the type and mass fraction of binder added, the density of B/KNO₃ charge and the sealing property of the input end on the ignition power and ignition delay time were experimentally studied. The results show that the B/KNO₃ laser igniter with the potassium nitrate particle size of 2~12 μm , the mass ratio of w_B to w_{KNO_3} of 3 : 7, the addition of 3% phenolic resin and the charge density of 1.6g·cm⁻³ has the best ignition performance, the ignition power and ignition delay time are 4.52W and 160ms respectively. The sealing design of B/KNO₃ laser igniter can further enhance its ignition performance with the ignition power of 4.24W and the ignition delay time of 120ms respectively.

Key words: Laser ignition; B/KNO₃; Charge parameter; Light window igniter; Ignition performance

针对现代武器高安全性和高可靠性发展需求, 由激光器、保险与保险接触装置、激光火工品等组成的直列式激光点火系统, 因其优良的点火性能和抗电磁辐射性能而得到快速发展^[1-2]。其中, 激光与药剂的相

互作用是激光点火技术的主要研究方向之一, 药剂本身的热性能对激光点火器的发火性能有很大影响。硼/硝酸钾 (B/KNO₃) 具有高输出性、高可靠性和感度适中优点, 是直列式点火系统唯一许用的点火药剂

收稿日期: 2022-05-19

作者简介: 郭伟 (1997-), 男, 在读硕士研究生, 从事火工品技术研究。

[3-8]。国内外研究发现, B/KNO₃ 的粒度和配比、添加粘结剂的种类和质量分数、装药密度和点火器密封性都会对其激光点火性能造成影响^[9-14]。

为探究 B/KNO₃ 激光点火器的装药参数对其点火性能的影响, 笔者设计了光窗式激光点火器并搭建了激光点火系统, 试验研究了硝酸钾粒径、硼与硝酸钾配比、粘结剂种类与质量分数、点火器装药密度及输入端密封性等因素对其发火功率和点火延迟时间的影响。

1 试验

1.1 试验仪器与试剂

仪器: WPL1-Y1009-A22-80810- 50.0W-LCD 半导体激光器、WPL4-40022-S-L100-S3H 光纤、SMA905 光纤连接器, 波粒北京光电科技有限公司; 压药模具和收口模具, 非标定制; MC-40 粉末压片机, 长沙米淇仪器设备有限公司; MSOX2024A 示波器, 是德科技有限公司; 2CU2B 硅光敏二极管, 杭州电子市场光禾电子商行; 防爆箱, 350mm×350mm×350mm, 非标定制; EM-30 扫描电子显微镜, 北京天耀科技有限公司; HCT-1 差示扫描量热分析仪, 北京恒久科技试验设备有限公司。

试剂: 乙醇、乙酸乙酯、酚醛树脂、氟橡胶、硝酸钾, 分析纯, 天津渤海化工集团供销公司; 硼粉, 上海乃欧科技有限公司。

1.2 点火药制备

常温下, 将硝酸钾溶于蒸馏水中, 制成一定量的饱和溶液, 溶剂为水, 反溶剂为乙醇; 采用喷射细化技术对硝酸钾进行细化, 制备出 2 种不同粒径的硝酸钾样本; 将 2 种粒径的硝酸钾分别与粒径为 1 μ m 的硼粉按照 $w_B : w_{KNO_3}$ 为 7 : 3、6 : 4、5 : 5、4 : 6、3 : 7 的比例混合于研钵中充分研磨; 称取 1 g 混合物分别与质量分数为 1%、3%、5% 的酚醛树脂或氟橡胶溶于乙酸乙酯和无水乙醇中混合, 采用溶剂挥发法制备 B/KNO₃ 样品。称取 10 mg B/KNO₃ 样品分别以 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 g·cm⁻³ 的密度压至药环中, 并将玻璃片、药环依次组装在装药壳体中进行收口, 作为

B/KNO₃ 激光点火器样品。

1.3 发火功率与点火延迟时间测试

激光点火测试系统由半导体激光器、示波器、防爆箱、激光火工品和光敏二极管组成, 如图 1 所示。激光点火器采用光窗式结构, 如图 2 所示。激光器产生的激光通过光纤传输至点火器, 经过光学窗口作用到药剂表面。其中, 光学窗口选用石英材质, 直径为 6.8 mm、厚度为 1.5 mm, 满足透光性要求, 同时起到保护光纤的作用。

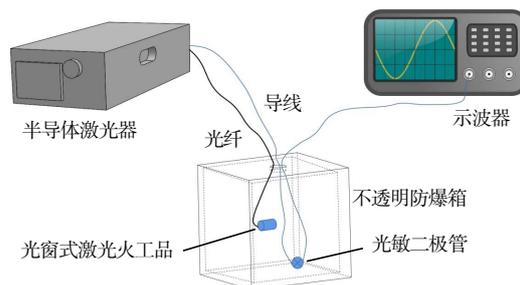


图 1 激光点火测试系统

Fig.1 Laser ignition test system

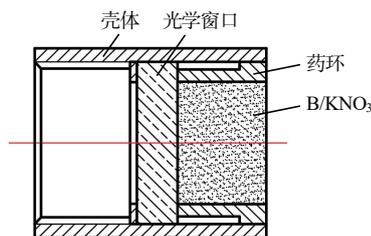


图 2 激光点火器结构

Fig.2 Laser igniter structure

测试发火功率时, 由小到大调节激光器的输出功率直至使激光点火器发火。测试点火延迟时间时, 利用二极管单向导电性, 在防爆箱黑暗空间内二极管为截止状态, 按下激光器触发电源, 示波器输出 0V 电压信号, 记为出光时刻 t_1 ; 当激光火工品作用后, 二极管接收到光信号而导通, 示波器输出 5V 电压信号, 记为发火时刻 t_2 ; 其时间差 Δt 即为点火延迟时间, 如图 3 所示。

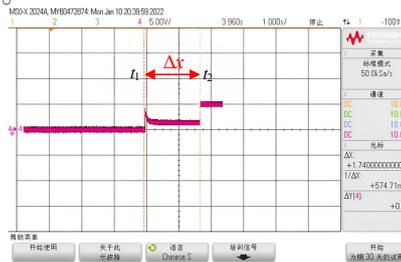


图 3 点火延迟时间测试

Fig.3 Ignition delay time measurement

2 试验结果与讨论

2.1 硝酸钾粒度对发火特性的影响

对2种粒径的硝酸钾样本进行SEM表征,结果如图4所示。由图4(a)~(b)可知,样本1中硝酸钾粒径为2~12 μm ,样本2中的硝酸钾粒径为2~5 μm ;由图4(c)~(d)可知,大范围SEM观测图中,样本1中硝酸钾的分散度优于样本2中硝酸钾的分散度,这可能是由于样本2中硝酸钾粒度较小,容易出现积聚现象。

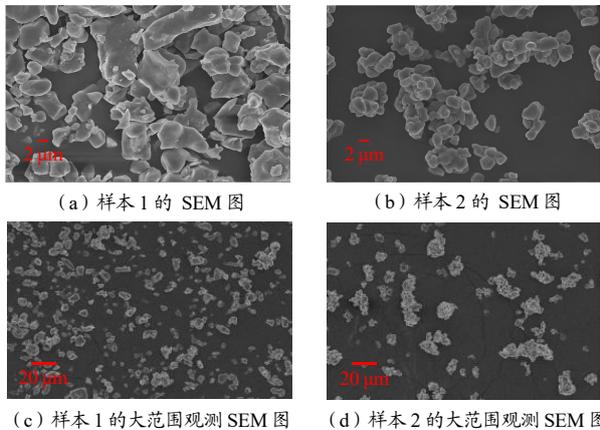


图4 不同粒径硝酸钾 SEM 图

Fig.4 SEM diagram of potassium nitrate with different particle sizes

试验测试硝酸钾粒度对B/KNO₃激光点火器点火性能的影响。试验样品中硝酸钾粒度分别为2~5 μm 、2~12 μm 和50 μm 3种,其他参数一致(点火药配比 $w_B : w_{KNO_3}$ 为3:7、粘结剂为3%的氟橡胶、装药密度为1.6g·cm⁻³)。针对每种粒度进行多次重复试验,去除有明显误差的数据,选取5组数据进行研究(后续试验沿用此思路),试验结果见表1。

表1 硝酸钾粒度对点火性能的影响

Tab.1 Effect of potassium nitrate particle size on ignition property

硝酸钾 粒度/ μm	发火功率/W					平均发火 功率/W	平均点火 延迟时间/s
	1#	2#	3#	4#	5#		
2~5	5.3	5.5	5.4	5.4	5.4	5.40	1.68
2~12	4.9	4.7	4.8	4.7	4.9	4.80	1.52
≈50	5.7	5.7	5.8	5.8	5.9	5.78	1.84

由表1可知,粒度在2~5 μm 和2~12 μm 的2种样品的点火性能优于粒度为50 μm 的样品。这是由于较小的药剂粒度能够增大可燃剂或氧化剂受激光照射的表面积,从而增强其对激光的吸收;且较小的药

剂粒度能够增加药剂接触的比表面积,从而加快化学反应速度,促进燃烧反应进行,进而降低发火功率、缩短点火延迟时间。

此外,硝酸钾粒度为2~12 μm 时,平均发火功率最低(4.80W),点火延迟时间最短(1.52s)。为了对比2~5 μm 和2~12 μm 2种样品的点火性能,对2种样品再次进行多组点火试验,结果表明:硝酸钾粒度在2~12 μm 时,其平均发火功率稳定在5W之下;硝酸钾粒度在2~5 μm 时,其平均发火功率均在5W之上;二者点火延迟时间相差稳定在0.2s以内。由此推断硝酸钾粒度在2~12 μm 时对808 nm激光更加敏感,因此选用该粒度样品进行后续试验。

2.2 点火药比对发火特性的影响

采用差式扫描量热法(DSC)对 $w_B : w_{KNO_3}$ 分别为7:3、6:4、5:5、4:6、3:7的5种配比B/KNO₃的热性能进行表征。每种配比B/KNO₃各称取3mg,试验温度范围为室温至600 $^{\circ}\text{C}$,升温速率为10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$,试验所得DSC曲线如图5所示。

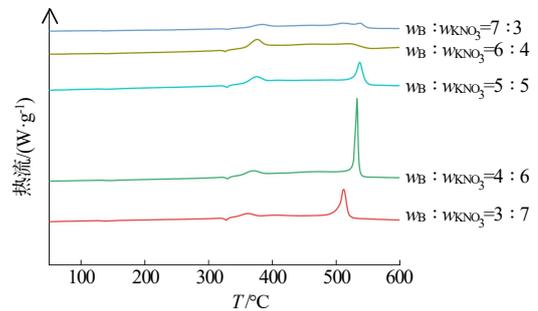


图5 不同配比B/KNO₃点火药的DSC曲线图

Fig.5 DSC plot of different ratios of B/KNO₃ ignition powder

由图5可知,5种配比B/KNO₃的DSC曲线均包含2个吸热峰和2个放热峰,且2个吸收峰温度基本一致。以 $w_B : w_{KNO_3}$ 为3:7的B/KNO₃为例,其吸收峰温度分别为136 $^{\circ}\text{C}$ 和327 $^{\circ}\text{C}$,分别对应硝酸钾的晶型变化温度与熔化温度。即5种配比B/KNO₃中,硝酸钾的晶型变化温度均在136 $^{\circ}\text{C}$ 左右,熔化温度均在327 $^{\circ}\text{C}$ 左右,表明配比的变化不会改变硝酸钾晶型变化温度与熔化温度。此外,随着氧化剂含量的增加,B/KNO₃的2个放热峰温度发生前移,当 $w_B : w_{KNO_3}$ 为3:7时,2个放热峰温度最低,分别为362 $^{\circ}\text{C}$ 和511 $^{\circ}\text{C}$,说明该配比下的B/KNO₃最早开始放热。

试验测试 B/KNO₃ 配比对激光点火器发火特性的影响。试验样品中粘结剂为 3% 的酚醛树脂、装药密度为 1.6g·cm⁻³。试验结果见表 2。

表 2 B/KNO₃ 配比对点火性能的影响

Tab.2 Effects of different ratios of B/KNO₃ on ignition property

w _B : w _{KNO₃}	最小发火功率/W					平均发火功率/W	平均点火延迟时间/s
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]		
3 : 7	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.52	0.16
4 : 6	5.0	4.9	5.0	5.1	5.0	5.00	0.20
5 : 5	5.3	5.5	5.1	5.5	5.4	5.36	3.22
6 : 4	6.5	6.8	6.4	6.5	6.5	6.54	3.76
7 : 3	7.2	7.0	7.5	7.3	7.4	7.28	3.90

由表 2 可知, 随着 B/KNO₃ 配比中氧化剂硝酸钾含量的减小, 平均发火功率逐渐增大、平均点火延迟时间逐渐变长。当 w_B : w_{KNO₃} 为 3 : 7 时, 平均发火功率最小(4.52 W), 平均点火延迟时间最短(0.16 s); 当 w_B : w_{KNO₃} 为 7 : 3 时, 平均发火功率最大(7.28 W), 平均点火延迟时间最长(3.90 s)。这是由于随着 B/KNO₃ 中氧化剂占比减小, 发生燃烧反应时硝酸钾为硼颗粒提供的能量与氧化产物减少, 不利于硼颗粒的燃烧, 导致发火功率增大、点火延迟时间变长。

2.3 添加粘结剂对发火特性的影响

试验测试粘结剂种类和质量分数对 B/KNO₃ 激光点火器发火特性的影响。试验样品分别添加质量分数为 1%、3%、5% 的酚醛树脂或氟橡胶, 共 6 种, 并设置 1 组无粘结剂的空白组作为参考, 其他参数一致: w_B : w_{KNO₃} 为 3 : 7、装药密度为 1.6g·cm⁻³。试验结果见表 3。

表 3 添加粘结剂对点火性能的影响

Tab.3 Effects of addition of binder on ignition property

粘结剂种类	w/%	发火功率/W					平均发火功率/W	平均点火延迟时间/s
		1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]		
酚醛树脂	1	5.6	5.5	5.7	5.5	5.6	5.60	1.72
	3	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.52	0.16
	5	5.0	4.8	4.9	4.8	5.0	4.90	1.40
氟橡胶	1	5.7	5.8	5.9	5.8	5.8	5.80	2.30
	3	5.1	5.4	5.3	5.2	5.4	5.28	2.65
	5	5.4	5.6	5.7	5.5	5.6	5.56	2.90
-	-	5.3	5.6	5.8	5.7	5.5	5.58	2.89

由表 3 可知, 在 B/KNO₃ 中添加粘结剂可有效改善激光点火器的发火特性, 且添加酚醛树脂比添加氟橡胶的 B/KNO₃ 激光点火器发火功率更低、点火延迟时间更短; 此外, 试验过程中发现未添加粘结剂时, 压药过程中药柱不易成型。随着酚醛树脂质量分数由 1% 增加至 5%, 其平均发火功率和点火延迟时间呈现

先增加后降低再增加的趋势, 当酚醛树脂的质量分数为 3% 时, 平均发火功率最低, 为 4.52W, 点火延迟时间最短, 为 160ms。

2.4 不同硝酸钾装药密度的影响

试验研究装药密度对 B/KNO₃ 激光点火器点火性能的影响。试验样品的装药密度分别为 1.3, 1.4, 1.5, 1.6, 1.7 g·cm⁻³, 共 5 种, 其 w_B : w_{KNO₃} 为 3 : 7、粘结剂为 3% 的酚醛树脂, 试验结果见表 4。

表 4 点火药装药密度对点火性能的影响

Tab.4 Effects of ignition charge density on ignition property

密度/(g·cm ⁻³)	发火功率/W					平均发火功率/W	平均点火延迟时间/s
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]		
1.3	5.2	5.4	5.2	5.3	5.2	5.26	2.66
1.4	4.9	5.0	4.8	4.9	4.8	4.88	2.44
1.5	5.0	5.1	5.0	5.0	5.1	5.04	2.04
1.6	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.52	0.16
1.7	5.0	5.2	5.0	5.1	5.1	5.08	3.10

由表 4 可知, 随着装药密度增加, 样品的平均发火功率和点火延迟时间呈现先减小后增大的趋势。这是由于随着装药密度增加, 一方面初始反应区的燃烧压力增大, 从而加快反应速率, 缩短点火延迟时间; 另一方面药剂孔隙率下降, 初始点火的燃烧产物渗入未反应区的难度增加, 不利于反应的传递, 从而导致点火延迟时间变长。即燃烧压力增大和孔隙率下降对点火性能起相反作用, 存在一个最佳装药密度(1.6 g·cm⁻³)使点火性能最优, 此时平均发火功率最低, 为 4.52W, 平均点火延迟时间最短, 为 0.16s,

2.5 输入端密封性对发火特性的影响

试验研究输入端密封性对 B/KNO₃ 激光点火器点火性能的影响。试验样品中 w_B : w_{KNO₃} 为 3 : 7、粘结剂为 3% 的酚醛树脂, 装药密度为 1.6g·cm⁻³。待压药和收口工序完成后, 在一组点火器输入端收口处涂一层厚度为 0.2mm 的硅橡胶以增强密封性, 并准备一组不涂硅橡胶的点火器作为对照组, 如图 6 所示。2 组点火器的发火试验结果见表 5。



图 6 涂胶和对照组

Fig.6 Gluing and control group

由表5可知,涂硅橡胶的点火器的平均发火功率最低,为4.24W,平均点火延迟时间最短,为120ms,表明输入端密封性对点火器发火特性有较大影响。这是由于在密封条件下,反应后的产物难以离开反应环境,热量消失的速度减慢,产生的压力也对点火起促进作用,增大压力有助于热点形成与成长,使得反应加速,从而降低了点火功率和点火延迟时间。

表5 输入端密封性对点火性能的影响

密封措施	最小发火功率/W					平均发火 功率/W	平均点火 延迟时间/s
	1#	2#	3#	4#	5#		
涂硅橡胶	4.0	4.5	4.2	4.3	4.2	4.24	0.12
未涂硅橡胶	4.5	4.5	4.6	4.6	4.6	4.56	0.16

3 结论

(1) 不同配比 B/KNO₃ 的热分析表明: 随着 B/KNO₃ 中氧化剂含量的增加, 其 DSC 曲线中的 2 个放热峰温度前移, 当 $w_B : w_{KNO_3}$ 为 3 : 7 时 B/KNO₃ 更容易发生燃烧。

(2) 激光点火试验结果表明: 硝酸钾粒径为 2 ~ 12 μm 、 $w_B : w_{KNO_3}$ 为 3 : 7、添加 3 % 的酚醛树脂、装药密度为 1.6g·cm⁻³ 的 B/KNO₃ 激光点火器的点火性能最佳, 其发火功率和点火延迟时间分别为 4.52W 和 160ms。

(3) 对 B/KNO₃ 激光点火器进行密封设计可进一步增强其点火性能, 在输入端收口处涂硅橡胶后, 其发火功率和点火延迟时间分别为 4.24W 和 120ms。

参考文献:

[1] 于晓静.关于钝感火工品中新技术、新含能材料研究[J].化工

管理,2018(8): 81-81.

- [2] 吴涛. 钝感火工品中新技术、新含能材料研究进展[J].科技资讯,2013(32): 75-75.
- [3] 钟海文,代媛媛,宋丽民,等.单光纤激光点火控制系统的研制[J].激光杂志,2020,41(1): 1-6
- [4] MIL-STD-1901 Munition rocket and missile motor ignition system design safety criteria for[S], 1992.
- [5] Roduit B, Borgeat C, Berger B, et al. Up-scaling of DSC data of high energetic materials:simulation of cook-off experiments [J].Journal of Thermal Analysis and Calorimetry,2006, 85(1):195-202.
- [6] 王端,李帅,高一隆,等.强电磁环境下火箭发动机直列式安全点火系统[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(4): 85-91.
- [7] 杨振英,郭少华,褚恩义.冲击片点火管[J].火工品, 2000(3): 17-20.
- [8] 史春红.直列式点火系统及其许用装药[J].火工品,1997(1): 48-52.
- [9] 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, 29(01): 50-53,60.
- [10] 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.
- [11] 叶迎华,舒浪平,沈瑞琪.酚醛树脂对 B/KNO₃ 点火药激光烧蚀特性的影响[J].含能材料, 2007,15(1): 33-35.
- [12] 沈瑞琪,叶迎华,胡艳,等.不同氧/燃比的硼-硝酸钾的激光点火特性[J].中国激光,2009, 36(2): 338-341.
- [13] 沈瑞琪,叶迎华,胡艳,等.激光烧蚀硼-硝酸钾的等离子体特性[J].中国激光, 2009, 36(1): 125-128.
- [14] 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.