文章编号：1003-1480（2020）02-0005-04

某半导体激光点火系统设计研究

王 端，高一隆，李 帅，李 焱，付世斌，武源波

（中北大学 环境与安全工程学院，山西 太原，030051）

摘 要：设计了一种使用半导体激光点火的火工品系统，该系统以 BNCP 起爆药或 B/KNO_3 点火药作为激光火工品药剂，采用直接点火的方式。通过对其点火延迟时间和点火能量的研究，最终确定了药剂的装药量及装药密度，实现了整个系统的低能可靠发火。同时对药剂进行了射频试验，结果表明当磁感应强度为 2T 时，不会影响药剂的发火性能。

关键词：点火器；激光点火；装药；防射频；低能

中图分类号：$TJ45^{+}4$ 文献标识码：A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2020.02.002

Research on the Design of A Semiconductor Laser Ignition System

WANG Duan, GAO Yi-long, LI Shuai, LI Yan, FU Shi-bin, WU Yuan-bo

（School of Environment and Safety Engineering，North University of China，Taiyuan，030051）

Abstract： An initiating system ignited by semiconductor laser was designed. The system adopted direct ignition method, which use BNCP primary explosive or B/KNO_3 ignition powder as laser initiating explosive. Through the study of ignition delay time and ignition energy, the charge mass and charge density were determined finally，so that the low energy and reliable ignition of the whole system was realized. At the same time, the radio frequency test of the charge showed that when the magnetic induction intensity is 2T, the ignition performance of the charge will not be affected.

Key words： Initiator；Laser ignition；Charge；Anti-RF；Low energy

随着现代武器装备技术的快速发展，以及电子对抗技术的不断进步，战场的电磁环境变得越来越恶劣，半导体激光火工品系统以其出色的电磁兼容安全性而成为新型火工品技术的研究热点，在国外已广泛应用于航天发动机点火和机构分离、航空乘员逃逸等许多领域[1]。激光点火系统采用光纤替代了桥丝和引线，使电磁脉冲、高功率微波、强射频和静电等信号产生的危害不复存在，从而从根本上解决了常规电火工品的安全问题，同时也消除了电火工品中因桥丝或桥带与药剂直接接触而带来的桥丝或桥带腐蚀、桥路电阻变化以及绝缘电阻变化等问题。激光点火起爆系统的主要部分可重复多次使用，可以不使用复杂的机械安全/解锁系统，容易实现多点同步点火和起爆。并且，常规的 1A1W5min 不发火要求也不再作为技术指标要求，从而大大简化了生产工艺[2]。本研究开展了一种使用半导体激光点火的火工系统设计研究。

1 系统组成及工作原理

1.1 试验装置

本研究的激光点火系统组成如图 1 所示，主要由电源、激光器、光纤、连接器、激光火工品、光电探

收稿日期：2019-12-18
作者简介：王端（1973-），男，研高工（教授），主要从事火工品设计与研究。
基金项目：中北大学研究生科技基金资助课题（No.20181564）;装备预研一般基金项目资助（61406190301）。

测器、示波器等组成。其中激光器采用的是能量可调的半导体激光器，其具体参数为：中心波长为 808nm，中心波长偏差为±10nm，输出功率为 0～30W，光谱宽度小于等于 3nm，波长温飘系数为 0.3nm/℃；对接光纤芯径为 400μm。连接器的作用是连接光纤和激光火工品。

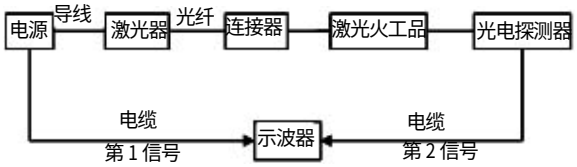

图 1 激光点火系统组成图

Fig.1 Laser initiation system composition diagram

该激光点火系统的工作原理为：电源给激光器提供电能的同时，输出第 1 信号给示波器，激光器输出激光通过光纤传递给激光火工品，火工品被引燃后输出火焰，光电探测器接收火焰的光信号，同时输出第 2 信号给示波器，2 个信号的时间差即为激光点火延迟时间[3]。其点火方式是一个光能转化为热能的过程，即激光集中辐射到药剂一点，使其急剧升温达到燃烧温度后，就会发生点火或燃烧转爆轰的过程[4]。对这种点火方式，主要研究其点火延迟时间和点火能量。

1.2 激光火工品设计

激光火工品通过光纤实现能量到药剂的传递，避免了药剂与外界的直接联系，从根本上保证了该类火工品的抗静电、杂散电流等电磁安全性[5]。除此之外，激光火工品还具有发火能量低、发火可靠性高等优点[6]。

BNCP 属于一种新型的安全钝感的起爆药，具有光敏性质，常被用于激光雷管和激光发火件中，具有可靠的发火、输出性能。药剂的激光感度对实现低能激光起爆影响较大，由于 BNCP 外表颜色为浅色，需对其掺杂一定比例的深色或黑色物质，增加药剂对激光的吸收能力，实现低能起爆的目的。陈利魁等研究发现 BNCP 起爆药掺杂 5%的 C，其 50%发火阈值最小，平均延期时间最短[7]，故本研究选取含 5% C 的 BNCP 作为试验药剂之一；同时 B/KNO_3 点火药作为常用火工药剂，具有很多优点，并在常规武器、航空及航天武器中得到了广泛的应用[8]。本研究中也将 B/KNO_3 点火药作为研究对象。

称取一定量的掺杂 5% C 的 BNCP 药剂、B/KNO_3 药剂和分别掺杂了 3%木炭和 3%石墨的 B/KNO_3 药剂，然后将药剂以一定的压力压入铝壳（φ3mm×3mm）中，最后将该铝壳装入厚度为 2mm 的玻璃窗口的激光火工品壳体中，收口之后即为激光火工品。激光火工品结构示意图见图 2。

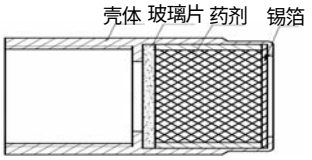

图 2 激光火工品结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of laser initiator structure

本研究中所使用的微凸透镜的焦距为 4mm，焦点直径为φ0.4mm，所设计的激光火工品采用微凸透镜光窗式结构，将光学窗口与火工品壳体进行封接[9]，可以获得高强度、高密封性的火工品，实现光纤接头传输的激光通过微凸透镜聚焦在玻璃片上作用于火工品，玻璃片的作用是为了保护微凸透镜，达到重复使用的目的，实物见图 3~4。

图 3 微凸透镜光窗式结构实物图

Fig.3 Physical picture of microconvex lens light window structure

图 4 微凸透镜光窗式结构装配实物图

Fig.4 Assembly picture of microconvex lens light window structure

2 试验结果

2.1 2 种玻璃片对同一药剂点火性能的影响

本研究共选用了 2 种玻璃片，分别是石英玻璃片和蓝宝石玻璃片，2 种玻璃片的强度一样，区别在于蓝宝石玻璃片的透光率更高。对 B/KNO_3 药剂和 BNCP 药剂在不同的激光能量下，进行了激光点火试验，试验结果见图 5~6。由图 5~6 可知，对比蓝宝石玻璃片与石英玻璃片，在同一种药剂、同一激光能量点火的前提下，选择蓝宝石玻璃片的激光点火系统点火延迟时间相对更短。因此，本激光点火系统将选用

蓝宝石玻璃片作为保护窗口。

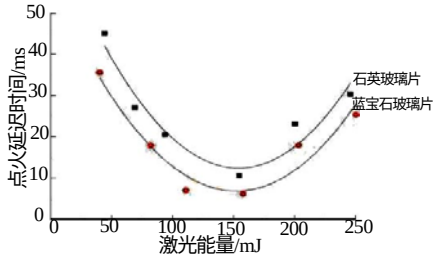

图 5　石英/蓝宝石对 B/KNO₃ 点火性能的影响

Fig.5　Effect of quartz/sapphire on ignition performance of B/KNO$_3$

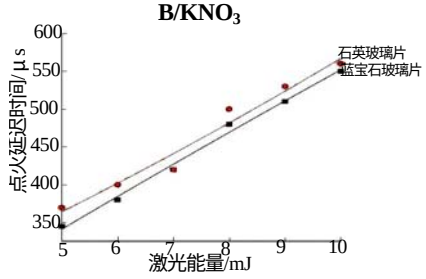

图 6　石英/蓝宝石对 BNCP 点火性能的影响

Fig.6　Effect of quartz/sapphire on ignition performance of BNCP

2.2　木炭/石墨掺杂对 B/KNO₃ 药剂的影响

由于 B/KNO$_3$ 药剂自身颜色为黑色药剂，对于激光的照射有较好的吸收性。但是，为了更好地提高药剂对激光的吸收性，缩短激光系统的发火时间，在 B/KNO$_3$ 分别掺杂 3%石墨和 3%木炭，对这 3 种药剂进行了激光发火试验，试验结果见图 7。

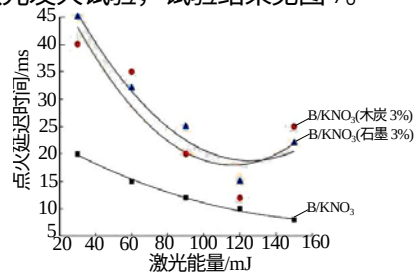

图 7　木炭/石墨掺杂对 B/KNO₃ 药剂的点火性能影响

Fig.7　Effect of charcoal/graphite doping on ignition performance of B/KNO$_3$

由图 7 可知，掺杂了石墨和木炭的 B/KNO$_3$ 药剂反而比未掺杂的 B/KNO$_3$ 药剂的点火延迟时间更长。经过分析，认为其原因是：掺杂的石墨和木炭虽为黑色物质，但 B/KNO$_3$ 药剂也呈黑色，在对增加 B/KNO$_3$ 药剂的吸收激光能量方面并没有明显的影响，却因加入掺杂物增加了 B/KNO$_3$ 药剂的导热系数，药剂向环境传递的热量变多，加之这 2 种掺杂物本身具有的钝化作用使化学反应速度降低，故使得药剂体系的点火延迟时间反而变长。因此，为缩短整个激光系统的点火延迟时间，在 B/KNO$_3$ 药剂中加入一定比例的掺杂物是不可取的，但是对于大多数自身颜色是白色或浅色药剂而言（如 BNCP 起爆药），掺杂一定比例的黑色或深色物质会增加其对激光的吸收度，可实现低能快速发火。

2.3　不同装药量对药剂点火性能的影响

经过发火试验摸底，当激光器产生的功率至少为 8W 时，2 种药剂均可以可靠发火。为了比较不同装药量对不同药剂点火性能的影响，当激光器产生的功率定为 8W、装药密度为 1.70g/cm^3 时，通过改变药量，以 5mg 药量为 1 个步长，进行发火试验，每种药量试验 5 发，均取其平均值作为试验结果，试验结果见表 1。

表 1　不同药量发火试验结果

Tab.1　Test results of ignition with different charge mass

药剂	装药量/mg	是否发火	点火延迟时间/ ms
BNCP（掺杂 5%C）	10	否	-
	15	是	0.550
	20	是	0.508
	25	是	0.420
	30	是	0.350
	35	是	0.410
B/KNO$_3$	10	否	-
	15	否	-
	20	是	45.0
	25	是	30.1
	30	是	20.2
	35	是	26.7

从表 1 可以看出，当药量均为 10mg 时，2 种药剂均未发火，可知药量太少会影响药剂发火；当药量为 15mg 时，BNCP（掺杂 5%C）药剂发火，B/KNO$_3$ 药剂未发火，可知在相同的激光能量下 BNCP 比 B/KNO$_3$ 的激光感度更高；当药量不少于 20mg 时，2 种药剂均正常发火，且 BNCP 药剂比 B/KNO$_3$ 点火延迟时间更短，药量为 30mg 时点火延迟时间最短。因此，本激光点火火工品系统选用的药剂装药量为 30mg。

2.4　装药密度对药剂点火性能的影响

装药密度对药剂点火延迟时间的影响具有多样性，这是因为装药密度既改变了药剂的导热、热容、孔隙率、反射率等物理性能，同时也改变了反应热、燃烧速度等化学性能[3]。为了寻求 BNCP 和 B/KNO$_3$ 药剂在本激光点火系统中最佳的装药密度，本研究针对这 2 种药剂进行了在不同装药密度下的点火试验，每种装药密度试验 5 发，均取其平均值作为试验结果，试验结果见表 2。

由表 2 可知，为了达到低能快速发火的目的，通

过对比点火延迟时间和发火能量数值可知，2 种药剂最佳的装药密度范围应为 1.65～1.70g/cm^3。

表 2 装药密度对药剂点火性能影响的试验结果

Tab.2 Test results of charge density on ignition performance of reagents

药剂	密度/(g·cm^{-3})	点火延迟时间/ms	能量/mJ
BNCP（掺杂 5%C）	1.50	0.530	9.92
	1.55	0.480	8.76
	1.60	0.400	7.63
	1.65	0.350	5.21
	1.70	0.345	5.15
	1.75	0.420	7.31
B/KNO_3	1.50	-	-
	1.55	48.0	250.0
	1.60	30.5	180.0
	1.65	20.2	90.8
	1.70	18.3	75.5
	1.75	29.4	150.0

2.5 射频试验前后对药剂性能的影响

由于在现代及未来战场环境中会出现各种大功率无线电发送设备和电子对抗，致使武器系统周围环境电磁感应强度迅速提高，因此，对本系统中的药剂进行射频试验十分必要的。射频试验条件见图 8。

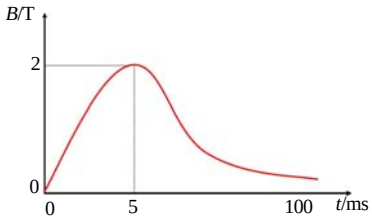

图 8 射频试验试验条件

Fig.8 RF test conditions

由图 8 可知，当时间为 5ms 时，磁感应强度到达峰值为 2T；当时间为 100ms 时，磁感应强度趋近于 0。激光火工品的玻璃片选择蓝宝石玻璃片，在装药量为 30mg、装药密度为 1.70g/cm^3 条件下，分别对装有 BNCP（掺杂 5%C）和 B/KNO_3 药剂的火工品进行试验，每种药剂火工品选取 5 发，取其平均值作为试验结果，试验结果见表 3。

表 3 射频试验前后药剂性能对比试验结果

Tab.3 The performance comparison of the reagents before and after the RF test

药剂	点火延迟时间/ms		能量/mJ	
	试验前	试验后	试验前	试验后
BNCP（掺杂 5%C）	0.345	0.348	2.15	2.20
B/KNO_3	18.5	18.2	75.8	74.2

由表 3 可知，在药剂进行射频试验前后，其点火延迟时间和发火能量几乎没有发生变化，因此，本激光点火系统中的药剂可以在磁感应强度为 2T 的情况下安全使用，且不影响药剂的发火性能。

3 结论

本研究中激光火工品中的玻璃片材料选择蓝宝石，其强度和透光率均满足设计要求；由于 B/KNO_3 点火药本身为黑色药剂，对其掺杂一定比例的深色物质，并没有增强其对激光能量的吸收率，反而会延长整个点火系统的发火时间；通过对 BNCP（掺杂 5%C）和 B/KNO_3 药剂在不同装药量、不同装药密度的状态下进行发火试验，得知最佳装药量为 30mg，最佳装药密度范围是 1.65～1.70g/cm^3。通过对 BNCP（掺杂 5%C）和 B/KNO_3 药剂进行射频试验可知，2 种药剂均可以在磁感应强度为 2T 的情况下安全使用，且药剂的发火性能没有受到影响。

参考文献：

[1] 徐奉一,张蕊,贺爱锋,等.激光火工系统用脉冲激光器可靠性研究[C]//第十六届中国科协年会论文集.西安:陕西应用物理化学研究所,2014.

[2] 张小英.激光单点点火系统技术研究[D].南京:南京理工大学,2006.

[3] 严楠,曾雅琴,魏继锋,等.B/KNO_3 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.

[4] 党瑞荣, 李甲连. 激光点火与起爆系统[J]. 探测与控制学报, 1999, 21(3):3-6.

[5] 祝明水,邢宗仁,蒋明,等.激光火工品单光纤光路检测技术[J].含能材料,2014,22(04):525-528.

[6] Roman N B M. Laser igniton of explosives and its application in a laser based igniton system [C]//Proceedings of the 16th International Pyrotechnics Seminar.Jonkoping,Sweden, 1991.

[7] 陈利魁,盛涤伦,杨斌,等.掺杂对 BNCP 半导体激光起爆感度的影响[J].含能材料,2009,17(02):229-232.

[8] 叶迎华,沈瑞琪,孙中会.光斑直径对含能材料激光点火性能的影响[J].爆破器材,2006,35(3):1-3.

[9] 王悦勇,麻永平,程伟民,等.激光点火多路起爆关键技术及发展[J].火工品,2010(01):53-56.