

文章编号: 0258-7025(2002)11-1037-04

含能材料激光点火性能的试验研究

张会生

张小兵, 袁亚雄

(上海交通大学动力与能源工程学院, 上海 200030) (南京理工大学动力工程学院, 江苏 南京 210094)

提要 分析了固体含能材料光吸收性的特点, 采用了既利于材料吸收又便于普通光纤传输的大功率固体 Nd^{3+} : YAG 激光器, 对各种含能材料进行了激光点火性能的试验研究, 成功测得了各种含能材料的点火过程曲线, 并对影响含能材料激光点火性能的各种因素(激光能量、脉冲持续时间、不同药粒等)进行了实验分析。结果表明, 不同含能材料的激光点火性能存在较大的差异, 这不仅与激光特性有关, 而且与含能材料的热物性有着密切的关系。这必将为含能材料激光点火系统的设计提供参考和依据。

关键词 激光器, 点火, 含能材料, 火炮

中图分类号 TN 248 文献标识码 A

Experimental Study on the Laser Ignition Characteristics of Energetic Materials

ZHANG Hui-sheng¹, ZHANG Xiao-bing², YUAN Ya-xiong²

¹Power & Energy Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030

²Power Engineering Institute, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094

Abstract The high power Nd^{3+} : YAG laser is selected in the experiments owing to the light absorptivity of energetic materials and the light transmission in the optical fiber. Several kinds of energetic materials are ignited using laser energy. The ignition curve of energetic materials is successfully obtained. The factors which affect the laser ignition characteristics of energetic materials are analyzed, which include laser energy, pulse width, the grain size etc. The experimental results show: the laser ignition features of different energetic materials exists distinction. It is mainly caused by the thermal physical quality of individual energetic materials. This will provide references for the design of laser ignition systems.

Key words laser, ignition, energetic material, gun

1 引 言

近年来, 各国学者提出了许多用于各类武器装药的点火系统, 常用的有电点火、等离子点火以及激光点火等。与利用常规的化学方法引燃固体含能材料相比, 使用脉冲激光源点火具有许多优点^[1]。传统的点火系统通过撞击或电流加热烟火剂或炸药来给发射药提供能量, 在这些装置中, 火药床的同时点火和火焰均匀传播不能得到有效控制, 燃烧的不稳定就会导致压力振荡, 激光点火可以通过光纤分束技术简单地制成多点点火系统, 采用与光纤网络相连而分布于装药床中的激光点火器直接进行多点点

火, 可以通过同时点火来改善装药床的火焰传播特性, 从而从本质上降低压力波动。通过光纤, 强激光能量可以在很高的空间及时间精度(ns 或 ps 量级)条件下传输给多个点火位置, 并且传输给装药床的能量密度也可以通过控制达到很好的重复性。此外, 采用激光点火系统后, 武器系统的可靠性、操作的简单性以及安全性等都可以得到较大的提高^[2]。

随着激光技术的不断发展, 激光器价格降低及性能的提高, 都使得激光点火系统的广泛应用成为可能, 又加上激光点火系统所具有的良好应用前景, 各国学者都投入大量的精力开始了对含能材料激光点火性能的研究, 研制实用的激光点火系统。以色

收稿日期: 2001-09-04; 收到修改稿日期: 2001-12-30

作者简介 张会生(1971—), 男, 上海交通大学动力机械及工程系副教授, 博士, 主要从事含能材料燃烧性能研究、先进循环系统分析及热动力系统仿真研究。E-mail: zhslm@sjtu.edu.cn

列、德国等欧洲国家在激光器小型化方面作了大量的研究,尤其是美国在 90 年代初期提出了“火炮、榴弹炮和坦克炮激光点火研究计划”(LIGHT Program)^[2],从而拉开了大口径火炮激光点火技术研究的序幕。LIGHT 计划的近期目标是除去底火,利用激光点燃少量的感光含能材料,从而引燃装药床;其远期目标是取掉点火所用的烟火剂等材料,利用激光能量直接作用于发射药来点燃,大大简化了大口径火炮的点火系统,从而为火炮系统的发射安全性、工作可靠性和操作简单化做出贡献。为了了解各种含能材料的激光点火性能,本文将针对发射系统常用的一些含能材料,利用大功率固体激光器对其进行了激光点火性能的试验研究。

2 试验装置

应用于火炮系统的各种含能材料的激光点火性能不仅仅取决于它们的化学、物理及热学性质,而且与其光学性质有关。激光源作用于固体材料或高温分解的燃气,当其波长对应于吸收跃迁时,点火临界能量就会很低,这样采用小型、低能量的激光器就可以直接点火。研究表明,在同样的含能材料条件下,当激光波长恰巧对应于材料吸收跃迁时,利用该波长的激光点火所需要的能量仅为其他条件下的 $1/60^{[3-5]}$ 。通常可用作点火源的激光器有准分子惰性气体激光器(Excimer Laser)、 CO_2 激光器、固体激光器以及小型二极管激光器等。惰性气体激光器属于紫外线光源,它可以以较高的重复率产生激光,大多数含能材料在紫外线波段都能较好地吸收激光,但这种激光器的脉冲宽度太短(ns 量级),难以可靠点火,很高的峰值功率极易引起含能材料烧蚀而达不到点火的目的。此外,这类激光器所产生的紫外线波长接近于 193 nm、248 nm、308 nm,这些波长的激光不容易通过光纤来进行传输,并且会烧坏光纤的连接头。 CO_2 激光器可以方便地产生高能量的脉冲,比较容易点燃含能材料,但它产生的激光波长为 $10.6 \mu\text{m}$,这种波长的激光难以通过普通的光学部件来传输,它可以在锗光纤中传输,但锗光纤质地特别脆,造价昂贵,并且制造长度受到限制,难以应用于远距离的网络多点点火系统中。固体激光器是一类有较好应用前景的点火源, $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器和 $\text{Nd}^{3+}:\text{glass}$ 激光器属于这一类,它们的波长分别为 $1.06 \mu\text{m}$ 和 $1.05 \mu\text{m}$ 。该波长的激光可以通过耐用、价格低廉的融硅光纤远距离传输且损失可忽略

不计。这类激光器既能连续态工作,又能产生宽度为 ps 到 ms 的脉冲。这些波长可有效地穿过能够耐高压的蓝宝石窗,为高压条件下激光通过蓝宝石窗引燃发射药打下基础。由于固体激光器的这些优良特性,本文将采用固体 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器对固体含能材料的激光点火进行实验研究。

激光直接点燃火药床将使得底火和点火管等从传统的点火序列中消失,这将避免传统点火系统的弱点,大大地简化点火系统;同时,这种点火概念还适用于在大口径火炮中有较好应用前景的不敏感弹药的点火。本文主要利用大功率激光来点燃点火用固体含能材料,从而为激光点火系统应用于火炮系统做部分基础性工作。

实验装置如图 1 所示,整个装置由激光器、光学回路系统、数据测试系统构成。激光器采用参数可调的高功率固体 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光器,由它产生激光来作为点火源,同时作为点火开始的同步信号。该激光的脉宽及能量可调。光学回路系统由各类透镜和反射镜组成,主要完成激光能量有效地作用于含能材料样品,同时将同步信号传输至数据采集系统。数据测试系统包括能量计、光电倍增管及光敏二极管等光接收部件和可存贮示波器等数据采集处理仪器。激光发射后,沿着光路到达含能材料样品(选取 50 mg),同时所产生的激光同步信号传输至示波器作为点火的开始。随着激光能量对含能材料样品的加热,含能材料表面温度逐渐升高,当温度达到着火点时,含能材料被点燃而产生光信号,这一光信号通过光电倍增管转换为电信号而传输到可存贮示波器,从而得到含能材料由激光作用开始到着火点的整个点火过程的信息,由此可以了解含能材料激光点火延迟情况和随各种条件的变化规律。

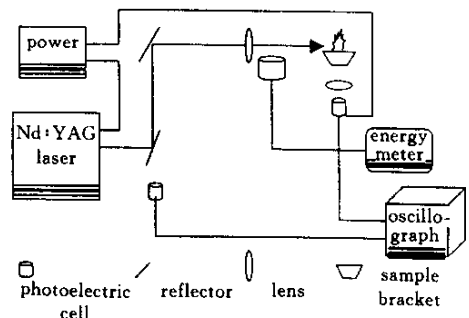


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch of experimental system

3 实验结果分析

利用所建立的激光点火性能试验装置,本文对影响含能材料激光点火性能的各种因素进行了试验研究。图 2 给出了两种不同含能材料(大粒黑药和烟火剂)的激光点火过程曲线,从图中可以看出:水平线是光信号的基准线,起始阶段的小峰是由激光信号所产生的,它代表激光点火作用的开始,后面的曲线上升才是含能材料逐渐燃烧的过程。从激光开始作用到含能材料着火产生光信号的这段时间称为点火延迟时间。

无法被点燃。这一点与文献 3,6 中所给出的结论相一致。

在激光能量为 1.5 J 的条件下,单个脉冲持续时间对激光点火延迟的影响可见图 4。随着脉冲持续时间的增大,激光施加给含能材料的能量增多,因此点火延迟逐渐降低;当脉冲持续时间大到足以在一个脉冲内点燃含能材料时,此时点火延迟将停留在一定值,即当达到着火点后,含能材料将进行自维持燃烧,不再需要激光能量。

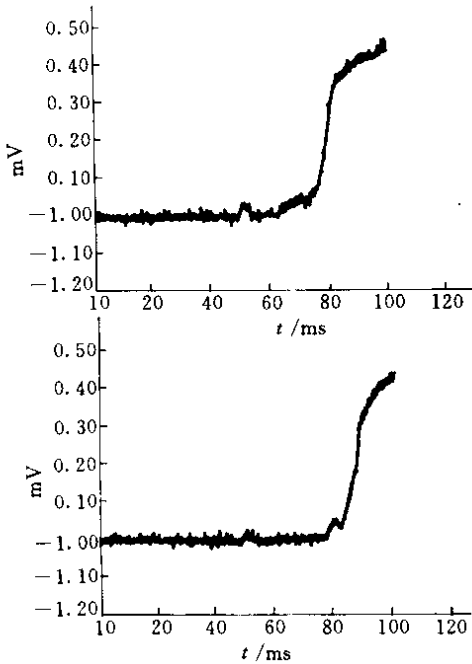


图 2 激光点火过程典型曲线

Fig.2 Typical curves of laser ignition process

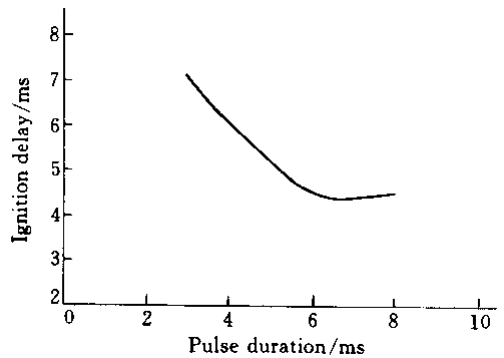


图 4 脉冲持续时间对点火延迟的影响

Fig.4 Effect of pulse duration on ignition delay

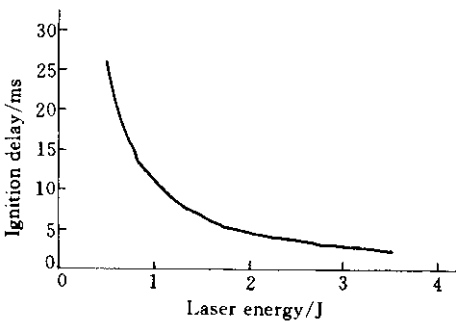


图 3 激光能量对点火延迟的影响

Fig.3 Effect of laser energy on ignition delay

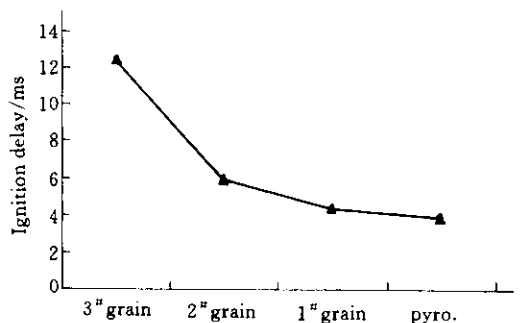


图 5 不同药粒点火性能的比较

Fig.5 Comparison of the ignition feature of different grain

图 5 给出了几种不同大小的药粒在相同的激光作用条件下(1.5 J)的激光点火性能的差异。其中 3 #、2 # 和 1 # 为同一种含能材料(黑火药),只是药粒的尺寸逐渐减小,烟火剂尺寸最小,为粉末状。从中可以看出,含能材料的点火延迟时间由于颗粒的大小而存在较大的差异,因此在激光点火器中对于点火所采用的含能材料药粒必须要加以选择,以保证点火过程的顺利进行。

图 3 给出了入射激光能量对某含能材料点火延迟时间的影响关系。随着激光能量的减小,作用在含能材料表面的光功率将逐渐变小,因此热量积累到着火点所需的时间增加,该含能材料的点火延迟时间急剧增大;当激光能量降低到一定程度后,它将

此外,由于受到激光器能量等的限制,在给定的条件下,各种发射药的点火存在一定的困难,利用激光难以实现直接点火,因此我们仅对发射药的激光点火延迟性能进行了初步粗略的实验统计。当激光

能量为 1.6 J, 脉冲宽度为 4 ms 左右, 重复率为 1 Hz 时, 采用秒表计时, 枪药在经过两次脉冲后可以着火, 双芳-3 火药约需要 30 s 左右才能燃烧, 7 孔单基药大约 5 s 左右着火, 而 19 孔太根药和高氮量单基药在 1 Hz 的重复率时则不能引燃。当对激光进行调制后, 并采用 25 Hz 的重复率时, 枪药和 7 孔单基药在 1 s 作用开始燃烧, 对其他几种发射药, 如高氮量单基药、双芳-3 火药及太根药等则需要 2~5 s 左右才能引燃。

4 结 论

通过以上对几种含能材料的激光点火性能的实验研究, 得到了以下结论:

1) 成功测得了黑火药、烟火剂等激光点火过程曲线。在激光点火过程中, 激光能量、脉冲宽度、药粒大小等都对点火延迟有一定的影响;

2) 对于黑火药、烟火剂等材料, 利用激光能量可以点燃, 并且其药粒型号的不同会产生不同的点火延迟, 这将为点传火系统的优化设计提供参考和依据。

3) 对于发射药等材料, 由于受到激光能量等条件的限制, 虽然难于点燃, 但如果使用稍大的激光能量, 并辅以其他措施, 发射药同样可以点燃。

参 考 文 献

- 1 S. Rosenwaks. Trends in High Energy Laser Research in Israel-An Overview [R]. AIAA93-3151 ~ 3156
- 2 A. W. Barrows. Laser Ignition in Guns, Howitzer and Tanks: the LIGHT Program [R]. AD-A261049, 1994
- 3 Leo De Yong, Tam Nguyen, John Waschl. Laser Ignition of Explosives, Pyrotechnics and Propellants: A Review [R]. AD-A299465, 1996
- 4 Shen Ruiqi, Ye Yinghua, Zhang Suyi. Reactive photoacoustic spectrum of graphite ablated repetitively by a pulsed laser [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(11):437~440 (in Chinese)
- 5 Sun Tongju, Zhou M. F., Shen R. Q.. The TOFMS study of laser excitation the reaction of B/KNO₃ [J]. *Applied Laser* (应用激光), 1995, **15**(4):160~162 (in Chinese)
- 6 Zhang H. S., Chen H. P., Zhang X. B.. The study on the laser ignition model and its analytic solution of solid energetic materials [J]. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **B9**(4) 376~384 (in English)

敬 告 读 者

经有关部门批准,从 2003 年起《中国激光》B 卷(*Chinese Journal of Lasers B*)将改刊名为 *Chinese Optics Letters*, 因此, *Chinese Journal of Lasers B* 将从 2003 年起停刊, 特此通知。

11 年来, *Chinese Journal of Lasers B* 得到了广大作者、审稿者和读者的支持、关心和帮助, 编辑部全体工作人员对此表示衷心的感谢, 并希望你们以更大的热忱, 支持、关心和帮助 *Chinese Optics Letters* 的诞生、发展和延续, 使 *Chinese Optics Letters* 走上更高的台阶。

谢谢!

《中国激光》编辑部
2002 年 11 月