

文章编号: 1006-9941(2000)03-0141-04

# 激光点火技术的发展

胡 艳, 沈瑞琪, 叶迎华

(南京理工大学应用化学系, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 介绍了激光点火系统的主要构成及研究进展, 对激光点火过程及药剂点火特性的各种数值模拟方法进行了评述, 对激光点火装置的应用进行了展望。

**关键词:** 激光器; 激光点火系统; 激光点火模型

**中图分类号:** TB41

**文献标识码:** A

## 1 引 言

激光点火系统由激光器、光纤和光纤接头、激光点火元件及保险与保险解除装置等四部分组成。激光点火系统有如下一系列优点<sup>[1,2]</sup>: ① 用光纤取代桥丝和引线, 既可避免因电磁脉冲(EMP)、高功率微波(HPM)、强射频(RF)和静电等干扰信号产生的误点火, 还可避免因桥丝带来的锈蚀、点火后电阻(RAF)和绝缘电阻的变化; ② 激光点火系统容易实现多点同步起爆, 并可重复使用; ③ 利用激光起爆技术可实现猛炸药的爆燃转爆轰(DDT); ④ 由于激光点火系统中去掉了敏感的起爆药, 所以在生产、运输及勤务处理中更加安全。80年代中期, 随着激光器小型化及激光二极管、低损耗光纤的出现与应用, 激光点火技术已经得到了相应的发展。

## 2 激光点火系统的发展

### 2.1 保险与保险解除装置

由于激光器用低压电源启动, 其本身存在安全问题, 为确保激光器不发生意外启动, 并与光路隔离, 在设计中单独设立了电子控制与安全系统, 并要求该系统适应于多点控制和顺序选择, 具有小型化、抗高低温等特点, 保险解除则由两种独立的方式控制<sup>[3]</sup>。

### 2.2 激光器

70年代中期, 美国喷气推进实验室已研制出适用于激光点火系统的小型钕玻璃脉冲激光器, 其 1 ms 脉

冲能量输出为 2.8 J; 还研制出小型 Q 开关钕玻璃激光器, 其 20 ms 脉冲的最大输出为 60 J。80 年代后期, 美国 Quantic 公司生产的一种称为 Firefly 的小型自持 OEM 激光器已用于起爆装置, 其输出脉冲功率可达 100 W。

新发展的固体激光器主要是钕/钷铝石榴石激光器, 钕/钷钷石榴石激光器及用高温锆泵浦的钕/玻璃高温激光器。激光谐振腔也由原来的平面反射镜-平面反射镜谐振腔发展为角隅棱镜-平面反射镜谐振腔和波罗棱镜-波罗棱镜谐振腔。这些激光器都能产生较高功率(或能量密度)的脉冲, 以较大的点火阈值起爆几个分系统。但这些激光器效率还很低, 大约只有 1%~3% 的输入电能可转换成有效输出光能, 而且尺寸和重量太大, 成本较高。

激光器的最新发展是激光二极管(又称二极管泵浦激光器)的发展。激光二极管的发展先后经历了 P-N 结砷化镓二极管、双(多)异质结激光二极管和列阵式激光二极管等几个阶段, 多异质结的条形高功率激光二极管列阵最有希望成为新一代点火用激光器。由于激光二极管结构均匀, 体积和重量均实现了小型化, 因此它适用于各种温度、冲击和震动环境。80 年代中期以后, 激光二极管点火技术已成为一项最具生命力的技术。

### 2.3 光纤和光纤接头

#### 2.3.1 光 纤

起爆炸药的激光器必须具有较高的功率, 而产生高功率(或能量密度)脉冲的激光器很难将激光脉冲耦合进光纤中, 也很难在光纤中传播<sup>[1]</sup>, 这就要求改进光纤及光纤连接方式, 以增强光纤对高能量密度脉冲的

收稿日期: 1999-11-22; 修回日期: 2000-03-14

作者简介: 胡艳(1977-), 女, 硕士, 研究方向为激光与含能材料的相互作用及激光点火过程的模拟仿真。

传输性能,降低传输衰减损耗,使耦合衰减降低到最低程度。

影响光纤传输高能量密度脉冲的最重要因素是光纤端部的表面质量,通常采用抛光工艺来提高光纤端部的表面质量。有关光纤表面完整性与抛光技术的研究仍然是一项重要的课题。

70年代中期,降低光纤传输损耗的研究已取得很大进展,每千米光纤的衰减已从原来的上千分贝减少到几分贝。激光点火系统经常使用的光纤为分级指数光纤和步长指数光纤。光纤作为点火光缆要与点火元件中的初级装药相耦合,作为传输能源光缆要与激光器相耦合。耦合有三种连接方式<sup>[4]</sup>:光纤直接置入式、光纤“脚芯”式和光学窗口式。

### 2.3.2 光纤接头

光纤接头用来连接激光器、输出光缆和点火光缆,从连接类别上可分为单光纤与单光纤连接和单光纤与多光纤连接。目前文献所报道的连接结构有两种:一种是使用STC型卡式接头,这种光纤-光纤连接件易于操作且损耗低、可靠性高<sup>[1]</sup>;另一种是使用两个SMA型插头与一共用连接件连接,但这种接头可靠性较低<sup>[5]</sup>。

### 2.4 激光点火元件

激光点火元件的研制工作主要集中于三个方面:(1)确定含能材料对激光能量的敏感性;(2)元件制造中使用的密封封接工艺研究;(3)激光点火元件的设计、制造和测试。

激光点火元件从种类上可分为激光点火器和激光雷管两种。激光点火器由于强度较低,通常采用光纤脚结构;激光雷管要求密封性较高且强度较大,通常采用光学窗口结构。

#### 2.4.1 激光点火器

激光点火器的研究集中在激光束对炸药的作用上,不同的烟火药、起爆药和猛炸药对不同波长的激光有不同的反应,增益开关激光器发射的长持续时间脉冲对烟火药和起爆药的点火比猛炸药更容易<sup>[6]</sup>。

当激光器输出功率一定时,可采用多种方法降低炸药的点火阈值。通常在炸药中混合一些材料来增加炸药对激光的感度,如在CP炸药(高氯酸2-(5-氰基四唑酸)五氨络钴(III))中掺杂3.2%的碳黑可使其10ms脉冲点火阈值降低到0.47mJ<sup>[4,7]</sup>。另外也可采用其它方法,如使用小直径光纤,在光纤与药剂之间插入0.05mm厚的Mylar(聚对苯二甲酸乙酯)片,或使

用输出光束为抛物线轮廓的分级指数光纤等<sup>[8]</sup>。

激光点火器要求极高的密封性。1992年,Kramer<sup>[9]</sup>发明的光纤-金属密封封接工艺简化了原有的工艺,能应用于光纤脚点火器的制造。

#### 2.4.2 激光雷管

激光雷管的结构及其装药比激光点火器复杂得多,雷管的特点是要有稳定的爆轰输出。实现爆轰输出有两种途径:一是采用激光点燃起爆药完成爆轰转爆轰,这种方法使用敏感性起爆药,增加了生产及使用的危险性,因此不可取;二是采用猛炸药爆轰转爆轰结构,这种结构有利于生产和使用。

激光雷管使用的窗口材料有蓝宝石和磷玻璃两种,目前使用较多的是具有低熔点、高热膨胀系数的磷玻璃窗口。

为降低激光雷管点火时间,Setchell<sup>[10]</sup>利用钛/蓝宝石激光器和铷/YAG激光器使激光雷管的点火时间降低到50μs以下;减小点火药柱长度和约束片的厚度,对药柱和密封的严格控制也可以降低点火时间。

## 3 激光点火模型的建立

在实验研究中,人们试图模拟激光点火过程及药剂的激光点火特性建立一种数学模型,以预测各种药剂在激光作用下的行为特性,达到激光点火器优化设计的目的。从本质上讲,激光点火和热点火都是一个热过程<sup>[1,11,12]</sup>,因此激光点火数值模拟所用的理论属于热爆炸理论。

Ewick<sup>[2]</sup>应用一维有限差分模型计算了不同功率水平下激光二极管点燃CP/碳黑、Ti/KClO<sub>4</sub>的点火时间和点火阈值。在较高输入功率水平时,计算的点火时间与实验值较吻合,但预测的点火阈值明显低于实验值,这是因为在高功率水平时,点火时间短,径向热损失可忽略,而靠近阈值功率水平时,点火时间较长,径向热损失则不能忽略。因此,Ewick<sup>[11]</sup>在一维模型基础上,又建立了二维有限差分模型,结果表明,点火阈值随着光纤直径的增大而增大,随着脉冲宽度的减小而增大,随着温度的升高而减小。和一维模型相比,二维模型的模拟结果更接近实验值。

Skocypec等人<sup>[13]</sup>建立了包含入射光散射的一维模型,计算结果表明,在高功率水平(大于0.2W,长脉冲)下,辐射传热起决定作用;在低功率水平(小于0.2W,短脉冲)下,传导传热起决定作用。因此,激光点火器的材料和设计对低功率水平的点火至关重要。

Glass 等人<sup>[12]</sup>建立了激光二极管点火器的热响应三维辐射传热模型,计算结果与实验数据比较吻合。

Oestmark<sup>[14]</sup>试用 TOPAZ(一种二维有限元计算机模型)模拟激光点火过程,结果表明, TOPAZ 能很好地预测点火阈值,但不能预测点火时间。

孙同举等人<sup>[15]</sup>对激光输出参数(能量水平、光束直径、脉冲宽度)与药剂点火特性的关系进行了数值模拟,结果表明该数学模型及其解法基本可行,但模型对点火时间的计算结果尚未得到实验的支持。

由此不难看出,要运用这些模型来预测激光点火过程及药剂点火特性,对模拟参数的确定还有待进一步研究。

#### 4 激光点火技术的应用展望

Beyer<sup>[16]</sup>采用分光或分束技术,将光纤传输的激光进行二次能量分配,制成了单枝光纤多点点火装置。他选择一个细长的光纤,在光纤有关点上敷以适当的含能材料,在光纤一端照射使激光进入光纤传播,并在具有含能材料的部位实施点火。该技术有望用于大口径火炮的点火系统,以达到减少膛内轴向应力波,提高发射安全性及发射精度之目的。

由于激光点火技术具有诸多优点,三十多年来,国内外学者已对其进行了广泛而深入的研究。随着激光器、控制单元、光纤及其连接技术的发展以及炸药的改进,预计激光点火系统将逐步取代敏感的桥丝点火系统,并将得到广泛应用。

#### 参考文献:

- [1] Roman N B M. Laser ignition of explosives and its application in a laser diode based ignition system [C]. Proceedings of the 16th International Pyrotechnics Seminar, Jonkoping, Sweden, 1991.
- [2] Ewick D W. Finite difference modeling of laser diode ignited components [C]. Proceedings of the 15th International Pyrotechnics Seminar, Boulder, CO, 1990.
- [3] Stoltz B A. 对微激光武器系统提出的系统安全性和试验要求 [C]. 符绿化译. 美国第一届航天火工烟火会议录, NASA Stennis Space Centre, 1992.
- [4] Kramer D P. Laser-ignited explosive and pyrotechnic components [J]. American Ceramic Society Bulletin, 1993, 22(2): 78.
- [5] Klingsporm P E. Surface preparation and characterization of a 400  $\mu$ m diameter surface fused silica optical fiber for direct optical initiation applications [R]. DE 93005485, 1993.
- [6] Landry M J. Laser used as optical sources for initiating explosives [C]. Proceedings of the 16th International Pyrotechnics Seminar, Jonkoping, Sweden, 1991.
- [7] Ewick D W, Beckman T M, Kramer D P. Feasibility of a laser-ignited HMX deflagration-to-detonation transition device for the U S Navy LITES Program [R]. DE 91015210, 1991.
- [8] Ewick D W, Beckman T M. Ignition testing of low-energy laser diode ignited components [R]. MLM-MU-90-64-0003, EG&G Mound Applied Technologies, Miamisburg, Ohio, 1990.
- [9] Kramer D P. Hermetic fiber optic-to-metal connection technique [P]. USP 5143531, 1992.
- [10] Setchell R E. Prompt laser ignition and transition to detonation in a secondary explosive [R]. ConF-9404141, 1994.
- [11] Ewick D W. Improved 2-D finite difference model for laser diode ignited components [C]. Proceedings of the 18th International Pyrotechnics Seminar, Breckenridge, CO, 1992.
- [12] Glass M W, Merson J A, Salas F J. Modeling low energy laser ignition of explosives and pyrotechnic powders [C]. Proceedings of the 18th International Pyrotechnics Seminar, Breckenridge, CO, 1992.
- [13] Skocypec R. Modeling laser ignition of explosives and pyrotechnics; effects and characterization of radiative transfer [C]. Proceedings of the 15th International Pyrotechnics Seminar, Boulder, CO, 1990.
- [14] Oestmark H, Roman N B M. Laser ignition of explosives; pyrotechnic ignition mechanisms [J]. J. Appl. Phys., 1993, 73(4): 2003.
- [15] 孙同举, 沈瑞琪, 戴实之. 激光点火过程的数值模拟 [J]. 应用激光, 1996, 16(3): 110.
- [16] Beyer R A. 单枝光纤多点点火装置 [J]. 王凯民译. 火工情报, 1994(2): 119.

## Development of Laser Ignition

HU Yan, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua

(College of Applied Chemistry, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Constitution and development of laser ignition system are discussed in brief. Many numerical simulation methods on laser ignition course and ignition characteristic of explosive are reviewed and application of laser ignition device is proposed.

**Key words:** laser; laser ignition system; laser ignition model

### 征 稿 启 事

本刊已向国内外公开发行人。为把刊物办得更好,欢迎广大科技人员踊跃投稿。

#### 1 征稿内容:

- \* 炸药的合成与应用;装药、成型、加工及探伤技术;
- \* 推进剂、火工药剂、枪炮药技术、烟火剂和烟火技术;
- \* 含能材料用聚合物、增塑剂及其相关物的合成与应用;
- \* 复合含能材料的配方研制及相关科学技术;
- \* 含能材料的理化分析和检测;安定性、相容性以及储存寿命研究;
- \* 含能材料的安全性能及对外界刺激的响应;
- \* 炸药的爆轰性能和爆轰过程的研究;
- \* 含能材料的环境适应性和力学性能;
- \* 含能材料的热化学和反应动力学;
- \* 与含能材料有关的安全防护和环境保护技术;爆炸技术及其应用;
- \* 与本刊学科、专业相关的科研动态、会议简讯、获奖信息、书评或新书介绍等报道性文章。

#### 2 征稿要求:

- \* 论点明确,数据真实可靠。稿件一式两份,均为打印稿,最好能同时提供软盘,格式为\*.TXT。每篇文章(包括图表、公式、表格和文献等)以不超过6000字为宜,研究简报最好不要超过3000字。
- \* 来稿请一律附上中、英文摘要,研究论文的英文摘要可稍加详细点明主要结果和结论;插图图名和文字标注以及表格的题目请用中、英文对照标注;列出3~8个关键词及其英文译文。
- \* 使用法定计量单位,所用的量和单位的符号一律以GB3100~GB3102-93为准;参考文献书写格式遵照GB7714-87《文后参考文献著录规则》执行。

#### 3 来稿凡属省、部级以上科学基金资助项目和国家重点攻关项目者,请在首页处加上脚注并注明项目编号,并附上基金项目批准书的复印件。课题曾获奖者请附上获奖证明复印件。为防止稿件涉及本单位秘密,请附单位审查证明。

#### 4 来稿请提供中图分类号(根据《中国图书馆分类法》第四版)。

#### 5 来稿请附作者简介,格式如下:姓名(出生年-),性别(民族),籍贯,职称,学位,研究方向及论文篇数。请勿一稿两投。

#### 6 来稿请寄“四川省绵阳市919信箱301分箱《含能材料》编辑部”,邮政编码621900,电话:(0816)2485399或2485362。