

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.05.011

# 激光起爆技术在工程爆破中应用的可行性综述<sup>\*</sup>

占必文<sup>①</sup> 龙明喜<sup>②</sup>

①贵州久联民爆器材发展股份有限公司(贵州贵阳,550002)

②河南久联民爆器材发展股份有限公司(河南南阳,474364)

[摘 要] 文章结合工程爆破技术的特点,首先对激光起爆系统进行了重新划分,然后着重讨论了激光雷管结构设计制造、药剂选择及制造工艺、激光器、光能传输网络及系统连接与检测方式等关键技术。在当前的激光起爆技术水平下结合我国民用工程爆破特点,激光起爆技术运用在工程爆破领域,从技术和成本方面均具有实用性和可行性,并值得在未来的工程爆破中提升整个爆破技术的安全技术水平。

[关键词] 工程爆破 激光起爆 激光雷管 传输网络

[分类号] TD235.2<sup>+</sup>2 TN249

## 引言

激光起爆技术采用光纤或光学窗口取代电桥丝,用光缆取代电缆,避免了因静电等干扰信号产生的误发火,具有很高的安全性能<sup>[1]</sup>。目前,国外已经有多个武器系统采用激光起爆技术<sup>[2]</sup>。国内相关单位在激光起爆技术领域已经具备较强的技术水平<sup>[3]</sup>。在军事领域这项技术已经发展得较为成熟,但是在民用爆破领域,这项安全起爆技术的发展较为迟缓,当前工程爆破中使用的仍然是安全性较低的电起爆装置或更为落后的导火索起爆技术。日本在上世纪 90 年代初进行激光起爆系统工程爆破试验<sup>[4]</sup>,目前还未发现其它关于使用激光起爆技术实现工程爆破的实例。本文将对激光起爆技术在工程爆破领域中应用的关键技术进行分析与讨论,并给出相应的解决方案。

### 1 系统组成及划分

激光起爆系统是由激光器、光能传输分配网络及激光雷管几个部分组成<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。武器系统用激光起爆系统一般伴随武器一次使用,这种方式用在民用工程爆破中过于昂贵。根据工程爆破的特殊性,可将激光起爆系统分为 3 个部分:可重复使用部分、部分可重复利用部分及一次性使用部分。其中激光器及光分路器由于可以远离爆炸现场,是可重复使用部分;传输光缆在爆破发生后,部分受到爆炸和爆破后产物的冲击发生损伤,剩余的部分可以进行重复利用,因此属于部分可重复利用部分;激光雷管由于爆炸后完全破坏,是一次性使用部分。

通过这一划分将激光器及光分路器等高价值器件重复使用,将光缆这种可重复利用的部分尽量重复利用,并通过优化雷管设计,尽可能降低激光雷管成本,实现最佳的成本控制。



图 1 激光起爆系统构成图

Fig. 1 Schematic of laser initiating system

## 2 激光雷管设计制造

### 2.1 激光雷管的装药选择

激光起爆药的选择,首先要考虑药剂的激光敏感度。通过选择激光敏感药剂可以有效地降低发火激光能量。国内外对激光起爆火工药剂进行了系统的研究,Yong 等<sup>[6]</sup>通过红宝石激光器和 Nb 激光器对常用火工药剂的激光发火敏感度进行了测试,国内盛涤伦等<sup>[7]</sup>目前对新型的配位化合物起爆药的激光起爆性能进行了研究。表 1 中总结了研究中所涉及的火工药剂的激光点火阈值,从中可以发现,掺杂了炭黑的高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(BNCP)具有最好的激光敏感度,目前国外已经研制了多种 BNCP 为始发药激光雷管<sup>[8]</sup>。其次要考虑威力及安全性能,根据文献<sup>[9]</sup>中所列的几种药剂的各项性能对比,可以发现 BNCP 爆炸威力远大于传

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-05-09  
作者简介: 占必文(1955~),男,高级工程师,主要从事民爆器材研究、生产及应用。E-mail:guizhouxiaolong107@163.com  
通信作者: 龙明喜(1984~),男,工程师,主要从事工业炸药生产工艺运用及研究。E-mail:646696512@qq.com

统的起爆药,但是小于常用猛炸药,其机械感度、静电感度低于  $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$  及其它常用的起爆药,5 s 爆发点到达  $362^\circ\text{C}$ ,耐温性能也高于常用的起爆药。综合对比性能,说明 BNCP 是一种钝感的起爆药,推广使用可以有效地提高加工和勤务过程中的安全性。目前国内已经能够合成 BNCP<sup>[10]</sup>,并且制备工艺已达到了百克量级以上,通过扩大生产规模,建立专业的生成线,可以进一步提高产能,降低成本。此外, BNCP 起爆所需的外壳限制条件较弱,甚至在铝壳或塑料管壳中都可以完成 DDT 过程<sup>[11]</sup>,因此在雷管制造中可以选择这些成本较低的壳体材料,进一步降低生产成本。综合以上因素,首选的起爆药是 BNCP。

表 1 常用火工药剂激光点火阈值

Tab. 1 Laser ignition thresholds of common pyrotechnics materials

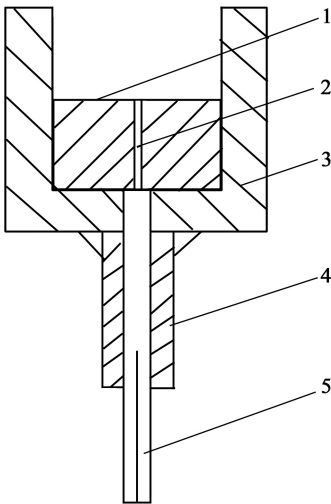
序号	含能材料类别	起爆阈值/(J·cm <sup>-2</sup> )
1	Zr/KClO <sub>4</sub>	1.27
2	B/KNO <sub>3</sub>	3.08
3	延期混合药 176	2.19
4	延期混合药 17	3.26
5	聚乙烯醇 Pb(N <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3.39
6	糊精 Pb(N <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	4.42
7	斯蒂芬酸铅	1.30
8	DACP(无掺杂)	1.45
9	BNCP(粒度 6μm, 掺杂 5% 炭黑)	1.22

2.2 激光雷管的结构设计与制作工艺

国内外的雷管结构主要有光纤脚型、宝石/玻璃窗口型<sup>[12]</sup>、透镜窗口型,分别如图 2、图 3、图 4 所示。

其中,图 2 的结构一般采用玻璃金属封接技术或钎焊技术,将光纤和金属套封接为一体,形成类似带脚线电极塞的结构,然后将光纤进行抛光,增加传输效率。其特点是光斑功率密度高,易于起爆。图 3 的结构一般采用蓝宝石或 P 玻璃作为窗口材料。由于光纤射出的激光是发散的,因此,穿过窗口后光斑会扩大,降低了起爆激光的功率密度,会增加雷管的发火阈值。图 4 的结构可以将发散光束聚集到药剂表面,有效克服了宝石/玻璃窗口光束发散问题。

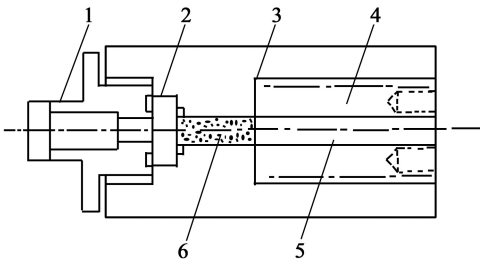
以上3种结构中,图2的结构由于采用的光纤成本较低,且玻璃金属封接及钎焊技术都已经发展成熟,采用这种工艺制作光纤脚可以实现批量化生产,有效降低成本。而其它两种结构由于采用的宝石和透镜窗口本身价格高,且产品结构和生产工艺



1 - 抛光面;2 - 光纤芯;3 - 不锈钢壳;  
4 - 帽口管;5 - 光纤

图 2 光纤脚结构

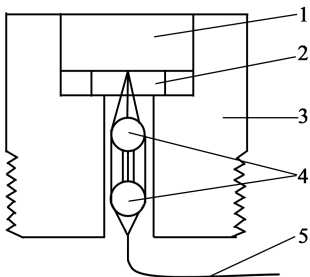
Fig. 2 Structure of optical fiber pin



1 - 光纤接头;2 - 蓝宝石窗口;3 - 约束片;  
4 - 转换药套筒;5 - 转换药柱;6 - 掺炭黑的药柱

图 3 宝石/玻璃窗口结构

Fig. 3 Structure of jewel/glazing



1 - 装药腔;2 - 蓝宝石窗口;3 - 壳体;  
4 - 球透镜组;5 - 光纤

图 4 透镜组结构

Fig. 4 Structure of battery of lens

都较复杂,不利于批量化生产。因此,在民用工程爆破中应用的激光雷管应该首选光纤脚结构。为了保护尾纤,可将尾纤用保护套管保护起来,用环氧胶将套管与光纤塞固定在一起,使其增加强度。

3 激光器

武器级激光起爆系统中对激光器的体积、质量及环境适应性能有严格要求,目前多为小型的固体

激光器及半导体激光器。其中,固体激光器具有较高的激光能量输出,可以实现多路起爆。例如应用在美国小型洲际弹道导弹项目中的小型固体激光器,可实现 10 路以上的多路起爆<sup>[13]</sup>。半导体激光器体积小、寿命长,并可采用简单的注入电流的方式,目前在武器级激光起爆系统中使用较多<sup>[14]</sup>。但是其输出功率低于固体激光器,因此,所能起爆的路数较少。根据国内外对激光起爆技术的研究,激光起爆用半导体激光器应该输出一个 10 ms 左右的脉冲<sup>[15]</sup>,保证足够的起爆光能,而固体激光器由于输出功率较高,一般输出一个 1ms 左右的单脉冲就可以满足起爆能量要求。

根据民用爆破的使用环境,对激光器的具体要求是:1) 选择现有产品,降低研制成本;2) 能够重复使用,操作简便,维护成本低;3) 便于运输,能够承受运输过程中造成的冲击振动;4) 光纤输出,便于对接。

目前国内多家单位已经生产商品化的固体激光器及半导体激光器,广泛应用在激光焊接和激光打标等领域<sup>[16]</sup>。图 5 是国内研制的光纤输出的大功率半导体激光器<sup>[17]</sup>。民用爆破可以直接从这些商品化的固体或半导体激光器中选型,并进行必要的技术改造。在多路起爆时,选择功率较高的固体激光器作为发火源。综合考虑,其输出功率应在 100W~1kW 左右,而当起爆路数较少时,可选择半导体激光器作为发火源,其输出功率应在 10W 左右。国外公布一种典型 BNCP 激光雷管,其全发火功率为 366mW,在 2 倍裕度及 50% 能量损耗时,以上能量配置的固体激光器和半导体激光器理论上分别至少可以同步起爆 60 路和 6 路左右。

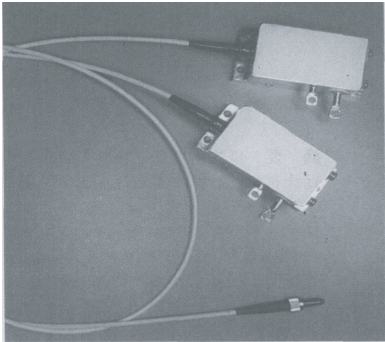


图 5 国内生产的 60W 半导体激光器

Fig. 5 60W domestic diode laser made home

4 激光传输网络

4.1 光分路器

在武器级激光起爆系统中,光分路器分为有源和无源两种。有源型一般采用电子器件控制实现分

路,可选延时功能;无源分路器一般仅能实现同步分路功能。有源光分路器的原理和光纤通信领域的程控器相似,典型的如图 6 所示。由于传输的激光能量高,且对延时精度、传输效率及分光可靠性要求高,这种专用的光分路器的研制和生产成本较高。当前常用光纤无源分束器采用光纤熔融烧结技术,结构简单,成本低廉,能量损耗低,国内已经研制出激光起爆系统专用的光纤分束器<sup>[18]</sup>,未来可以直接引入到民用爆破工程中,实现多点同步起爆,如果需要一定的延时控制,可以考虑采用在雷管中加入延期药来实现。

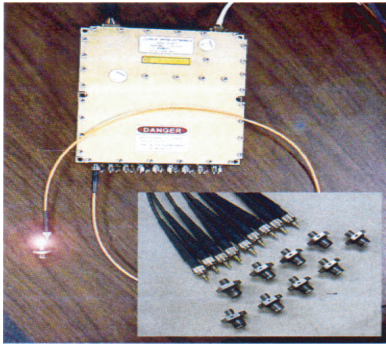


图 6 美国一种弹射座椅用多路光分路器

Fig. 6 A multiple light splitter of ejection seats made in USA

4.2 光纤光缆

一般来说传能光纤主要分为两种:塑料包层石英光纤(PCS)和石英包层石英光纤(HCS)<sup>[19]</sup>。两者相比,石英包层石英光纤的损伤阈值较高,可传输功率较大,适用于激光起爆系统,虽然其数值孔径一般只有 0.2 左右,但对起爆影响较小。在激光起爆系统中,一般采用芯径 $\geq 100\mu\text{m}$  阶跃型多模石英光纤,能量传输光纤的损耗已经下降到 3dB/km 左右,具有很高的能量传输效率、机械性能和环境适应性,随着光纤通信及大功率激光光纤耦合技术的不断发展<sup>[20]</sup>,目前光纤光缆的成本已经降到工程爆破可以接受的水平,传输光缆作为可重复利用部分,应该使用尽量长的光缆,这样可以留有足够的安全距离,单根传输光缆的长度至少 1km。

5 系统连接与检测

5.1 系统连接方式

武器系统通过各种光缆连接适配器实现各组成部分对接,国内外光缆连接适配器有很多种<sup>[21]</sup>。目前在激光起爆系统中常用 SMA905/906 或 FC/PC 适配器,这些适配器可以有效地降低对接时的插损及回损,提高光能耦合效率。虽然已经实现批量化生产,但这些适配器由于精度高,成本依然较高。为了解决这一问题,应在系统中尽量减少接头数量,并



将光纤适配器应用在系统中可重复使用的部分,减少不必要的消耗。对于光缆和雷管的对接,根据光纤脚式结构的特点,将光纤通信领域光缆铺设过程采用的光纤对接设备——光纤熔接机,引入到工程爆破领域,完成传输光缆中光纤和雷管光纤脚线的对接。由于光纤熔接技术在光纤通信领域已经相当成熟,因此这项技术在工程爆破领域能够得到推广。

## 5.2 现场光路检测

为了实现光能的可靠传输,激光起爆系统要对光路进行光路完整性检测。在武器装备中,一般都采用内置式光路检测设备,完成在线检测(Build-in-Test,简称 BIT)<sup>[22]</sup>。这些装置具备很高的精度和集成性,需要专门设计制造。而民用工程爆破中,系统集成度远不及武器装备;因此,可以采用几个组成部分分别测试的方法,简化测试系统的设计难度。可以采用光纤通信领域的通用路完整性检测设备,分别对几个光分路器及光缆进行起爆现场的光路检测。具体测试过程为:采用能测试大能量的激光能量计完成对激光器及光分路器各路连续性检测;采用光纤通信在光缆铺设和调试过程中最常用的光路检测设备,完成对光缆的连续性测试;完成光缆测试后连接激光雷管,然后再用 OTDR(optical time domain reflectometer)测试连接雷管后的光缆连续性,可在产品中加入完全反射检测光的薄膜,并且检测光功率应远小于激光雷管最大不发火激光功率,避免误发火,保证检测过程中的安全性;完成全部连续性检测后,将系统各部分连接在一起。

## 6 注意事项

1) 光纤抗折:当光纤弯曲小于其最小弯曲半径时,传输效率会明显下降<sup>[23]</sup>,当能量小于雷管的起爆阈值时,雷管就会瞎火,继续减小弯曲半径,光纤会折断,因此在光缆及带尾纤的激光雷管使用过程中,要避免使光缆弯曲小于其出厂规定的最小弯曲半径,以提高起爆的可靠性,并且可以采用铠装光缆结构,提高光纤的抗折、抗压及抗拉性能,提高其强度。

2) 装药过程抗油污及磨损处理:首先将光纤塞放置在酒精溶液中,用超声波清洗设备去除油污,装配前用高压气体吹净其抛光表面,并在其表面放置一层 Mylar 膜,增强其表面抗磨损性能,并采用环氧胶封接方式,提高雷管密封性,增强其耐受南北方不同气候和环境的能力。

3) 恶劣气候条件防护:为了应对雷电、高温、低温及雨雪等恶劣气候环境,在控制系统中加入防雷模块,采用当前光纤通信网络铺设过程中成熟的防

雨雪及高低温性能较好的光缆防护技术和连接技术,保证系统在恶劣气候条件下的适应性能,扩大激光器起爆系统的适应区域。

## 7 结论

1) 通过对激光雷管、激光器、激光传输网络、系统连接及检测方式等关键技术分析,结合当前激光起爆技术的研究成果和民用工程爆破的特点,在当前的技术条件下,已经具备了在民用工程爆破领域进行运用的可行性。

2) 结合我国光分路器、光缆的生产制造水平,开发出能够满足民用工程爆破要求的低成本激光起爆系统,将这种安全起爆技术在未来的工程爆破中进行推广,可提高整个行业的安全生产水平。

## 参考文献

- [1] 赵兴海,高杨,程永生.激光点火技术综述[J].激光技术,2007,31(3):306-310.  
Zhao Xinghai, Gao Yang, Cheng Yongsheng. A summary of laser ignition technology[J]. Laser Technique, 2007, 31(3):306-310.
- [2] Sumpter D. Laser-initiated ordnance for air-to-air missiles [C]//NASA. Stennis Space Center, The First NASA Aerospace Pyrotechnic Systems Workshop. 1993: 137-147.
- [3] 崔卫东,朱升成,史红漫,等.光纤对激光起爆系统的影响[J].火工品,2000(3):34-37.  
Cui Weidong, Zhu Shengcheng, Shi Hongman, et al. Effects of optical fiber on laser firing and initiating system [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2000(3):34-37.
- [4] 杜力.激光起爆系统[J].工业安全与防尘,1993(6):44-47.
- [5] 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):3-6,18.  
Dang Ruihong, Li Jialian. A laser firing and initiating system[J]. Journal of Detection & Control, 1999, 21(3):3-6, 18.
- [6] Yong L D, Nguyen T, Wasch J. Laser initiation of explosives, pyrotechnics and propellants: a review [R]. New York: Department of Defence, 1995.
- [7] 盛涤伦,朱雅红,陈利魁,等.激光与含能化合物相互作用机理研究[J].含能材料,2008,16(5):481-486.  
Sheng Dilun, Zhu Yahong, Chen Likui, et al. Interactional mechanism between laser and energetic compound [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5):481-486.
- [8] Hafenrichter E S, Marshall B W, Fleming K J. Fast laser diode ignition of confined BNCP[C]//AIAA, 41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Nevada, 2003.
- [9] 盛涤伦,马凤娥.新型起爆药 DACP 的合成及主要性能

- [J]. 含能材料, 2006, 14(3): 161-164.
- Sheng Dilun, Ma Feng'e. Synthesis and main properties of new initiating explosive DACP[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(3): 161-164.
- [10] 盛涤纶, 马凤娥, 孙飞龙, 等. BNCP 起爆药的合成及其主要性能[J]. 含能材料, 2000, 8(3): 100-103.
- Sheng Dilun, Ma Feng'e, Sun Feilong, et al. Study on synthesis and main properties of BNCP[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2000, 8(3): 100-103.
- [11] Fronaberger J W, Sanborn W B, Massis T. Recent activities in the development of the explosive: BNCP[C]//Proceedings of 22nd International Pyrotechnics Seminar. US: Pacific Scientific, 1996. 645-652.
- [12] 王凯民, 符绿化, 杨志强. 激光点火系统的设计[J]. 火工品, 1996(2): 31-37.
- Wang Kaimin, Fu Lihua, Yang Zhiqiang. Design of laser ignition system[J]. Initiators & Pyrotechnics, 1996(2): 31-37.
- [13] Chenault C F, McCrae J E, Bryson R R, et al. The small ICBM laser ordnance firing system[R]. AIAA Space Programs and Technologies Conference, 1992.
- [14] 贺爱锋, 刘彦义, 鲁建存, 等. 脉冲半导体激光器的温度补偿[J]. 含能材料, 2004, 12(增刊 2): 618-621.
- He Aifeng, Liu Yanyi, Lu Jiancun, et al. Temperature compensation of laser diode operating in pulse mode[J]. Energetic Materials, 2004, 12(Sup. 2): 618-621.
- [15] 朱升成, 鲁建存, 孙同举, 等. 含能材料对激光点火感度的影响[J]. 火工品, 2000(4): 19-22.
- Zhu Shengcheng, Lu Jiancun, Sun Tongju, et al. The influence of energetic materials on laser igniting sensitivity[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2000(4): 19-22.
- [16] 孙文, 周钢. 大功率光纤传输连续激光焊接系统[J]. 中国机械工程, 2002, 13(21): 1834-1837.
- [17] 王晓薇, 方高瞻, 王颖, 等. 60W 半导体激光器光纤耦合器件[J]. 高技术通讯, 2003(11): 35-37.
- Wang Xiaowei, Fang Gaozhan, Wang Ying, et al. 60W semiconductor laser fiber coupling device[J]. High Technology Letters, 2003(11): 35-37.
- [18] 曹椿强, 鲁建存, 刘举鹏, 等. 大功率激光两分束无源耦合器的优化设计[J]. 火工品, 2006(2): 38-40.
- Cao Chunqiang, Lu Jiancun, Liu Jupeng, et al. Optimization design of passive coupler with two-way splitter for high-power laser[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2006(2): 38-40.
- [19] 李钰, 张阔海, 李强, 等. 大功率激光光纤耦合技术研究[J]. 应用激光, 2004, 24(5): 276-278.
- Li Yu, Zhang Kuohai, Li Qiang, et al. Research on fiber optic coupling for the high-power laser beam[J]. Applied Laser, 2004, 24(5): 276-278.
- [20] 周崇喜, 刘银辉, 谢伟民, 等. 大功率半导体激光器阵列光束光纤耦合研究[J]. 中国激光, 2004, 31(11): 1296-1300.
- Zhou Chongxi, Liu Yinhui, Xie Weimin, et al. Analysis and design of fiber coupled high-power laser diode array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(11): 1296-1300.
- [21] 李乐霞, 贺岭. 激光起爆与点火系统中光纤连接器[J]. 火工品, 2002(1): 12-14.
- Li Lexia, He Ling. Optical fiber connector in the laser initiating system[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2002(1): 12-14.
- [22] Fahey W D, Carvalho J E. Optical Built-in Test (BIT) for laser (diode) initiation systems[C]//38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Prepublication Conference & Exhibit. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002.
- [23] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- Liao Yanbiao. Fiber optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.

## Feasibility Review of Laser Blasting Technology Used in Engineering Blasting

ZHAN Biwen<sup>①</sup>, LONG Mingxi<sup>②</sup>

①Guizhou Jiulian Industrial Explosive Materials Development Co., Ltd. (Guizhou Guiyang, 550002)

②He'nan Jiulian Industrial Explosive Materials Development Co., Ltd. (He'nan Nanyang, 474364)

[ABSTRACT] Combined with the characteristics of engineering blasting technology, the laser initiation system was redefined. Then the key technologies in terms of the structure design and manufacture of laser detonator, selection and manufacturing technology of chemicals, laser, optical transmission network, system connect and detecting method were discussed in detail. Combining laser blasting technology with industrial engineering blasting in the current laser initiation technology used in engineering blasting are practical and feasible from the aspects of technology and cost, and are worth of raising the safety technology level of the whole blasting technology in engineering blasting in the future.

[KEY WORDS] engineering blasting, laser initiation, laser detonator, transmission network