

引用格式:王铀,赵海,蔡庆春,等.激光远程排弹研究现状与关键技术[J].电光与控制,2018,25(1):60-64. WANG Y, ZHAO H, CAI Q C, et al. Laser disposal of UXO and IED:current status and key technologies[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(1):60-64.

激光远程排弹研究现状与关键技术

王铀, 赵海, 蔡庆春, 范盟
(中国人民解放军95856部队,南京 210028)

摘要:为解决传统的无定向系统处理未爆弹(UXO)存在的准备时间长、所需人员多、操作项目多、勤务环节多、安全系数低、难以处置撒布弹药等问题,探索定向能系统清除UXO的新模式,阐述了定向能系统处理UXO具有安全、快速、成本低、无噪声、操作隐蔽、可控制效应、相容性、机动性等优点;综述了国内外利用激光销毁UXO,IED和地雷的近期发展现状;提出了激光远程智能化排弹系统“看得见、打得着、可控制”的技术需求;指出了该系统的关键技术是多传感器复合探测技术,高可靠、紧凑、高能激光器技术,激光与危险爆炸物作用机理研究;分析了存在的问题以及解决的途径。

关键词:激光排弹;未爆弹;销毁;相干合成;关键技术

中图分类号: E928.9; TN249 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.01.013

Laser Disposal of UXO and IED:Current Status and Key Technologies

WANG You, ZHAO Hai, CAI Qing-chun, FAN Meng
(No. 95856 Unit of PLA, Nanjing 210028, China)

Abstract: This paper studies the issue of laser disposal of ammunition. It's necessary to solve the problems of the traditional undirected energy systems in dealing with Unexploded Ordnance (UXO), such as long preparation time, too many operation staff members, too many operational projects, too many service links, low safety coefficient and the difficulty to dispose scattered ammunition. First of all, the advantages of the directed energy system in removing UXO are expounded. For example, it is safe, fast, costs low, operates covertly, with controllable effects, compatibility, maneuverability and no noise. Secondly, the recent development of high-energy laser weapons at home and abroad are reviewed, especially in using the laser to destroy UXO, Improvised Explosive Device (IED), and mines. Thirdly, the technical requirements of the laser UXO disposal system are put forward. For example, it needs to be "viewable, target-reachable and controllable". Further more, the key technologies of laser disposal system are pointed out, including the multi-sensor detection technology, the reliable, compact and high-energy laser technology, and the mechanism of lasers and dangerous explosives. Finally, the existing problems and solutions are analyzed.

Key words: laser disposal of ammunition; unexploded ordnance; disposal; coherent beam combination; key technology

0 引言

未爆弹(UXO)通常是指在作战或演习中使用后未爆炸的弹药^[1]。此类弹药因高过载及着发碰撞过程,其引信机构的保险已部分或完全解除,火工品、弹

体装药的感度因强烈震动而提高,危险性较高^[2]。在战时,需要排除战区、占领区里补给线、桥梁、机场上的各种地雷和简易爆炸装置(IED)。而战后,如何处理遗留在世界各地的数亿个UXO和地雷已经成为冷战后国际军控与裁军谈判的热点问题^[3]。近年来,随着部队实弹训练任务的不断增加,排除靶场UXO的压力也进一步加重,如何安全、可靠、高效地排除UXO的难题日益凸显^[4]。

排弹的方法多种多样,关键是要针对未爆弹的具

收稿日期:2017-03-06

修回日期:2017-10-19

作者简介:王铀(1985—),男,湖南长沙人,硕士,工程师,研究方向为武器系统与运用工程、弹药销毁处理与储存保管。

体情况来选择合适的排除方法。若方法选取不当,不但不能完成排弹任务,反而易引发爆炸、火灾、中毒等安全事故,甚至造成人身财产损失。传统的无定向系统处理 UXO 的技术方法,会对附近区域的其他设备和系统造成影响或破坏,具有准备时间长、所需人员多、操作项目多、勤务环节多、安全系数低等弊端,且难以处置撒布弹药;而采用定向能系统,能够利用激光系统的可控制效应将间接破坏减至最低限度,不会毁坏附近的设备和系统,具有安全、快速、成本低、无噪声、操作隐蔽等优点^[5-7]。而且激光系统还具有相容性和机动性,容易与不同探测系统相连。另外,高能脉冲激光器还能够掘土,非常适合用来排雷。目前,美国正在大力开发这类技术。

为探索定向能系统清除 UXO 的新模式,本文综述了国内外利用激光销毁 UXO,IED 和地雷的近期发展现状,指出了激光排弹的关键技术、存在的问题以及解决的途径,对我国发展远程激光智能化排弹技术具有一定的参考意义。

1 国内外研究现状

1.1 国外研究现状

在激光远程排弹研究领域,美国成功开发了悍马激光军械失效系统(HMMWV Laser Ordnance Neutralization System,HLONS)和激光“复仇者”武器系统,在研的固体热容激光器(Solid-State Heat Capacity Laser,SSHCL)反 UXO 和 IED 系统功能更强大,均具有远距离、非接触、低爆轰和高机动的显著特点。

1) 悍马激光军械失效系统。

美国 SPARTA 公司和海军爆炸物处理技术部联合研究的悍马激光军械失效系统,通常被称为“宙斯”(ZEUS)^[8-9],它是一种将中等功率商用固态激光器(SSL)和光束控制系统(BCS)集成进悍马车,用来清除 UXO,IED 和地雷的武器系统,如图 1 所示。其组成主要包括高功率激光器、束定向器、标记激光器、彩色视频相机、控制台及配套的支持系统。



图 1 悍马激光军械失效系统

Fig.1 ZEUS-HLONS

“宙斯”系统的工作原理是:采用视频相机发现目标后,利用控制手柄调整相机位姿,使目标处于屏幕中

心(此时与视频相机位于同一个视轴上的激光器和束定向器就瞄准了目标),然后将标记激光射向目标并选择瞄准点。高能激光器产生的光束通过束定向器聚焦射向目标,使其装药着火燃烧而被摧毁。“宙斯”系统的射程为 25~300 m,排除单个 UXO 需要 2 s~4 min,一般不超过 30 s,每支激光枪成本仅需几美分,最多可发射 2000 次/d。同时,该系统可用运输机(C-17,C-130)空运或直升机空投,机动性强。

“宙斯”系统已在阿富汗和伊拉克进行了实战部署,目前配备的是 10 kW 的光纤激光器,能排除从塑料地雷到大型厚壁的 155 mm 炮弹和 500 lb(1 lb≈0.454 kg)常规炸弹等 40 余种不同类型的军械(包括地雷、改型常规弹药、迫击炮弹、枪榴弹、火箭弹、火炮炮弹),并具有在雨中和夜晚清除 UXO 的能力。

2) 激光“复仇者”武器系统。

美国波音公司还在“复仇者”武器系统上加装了激光系统^[10](见图 2),并于 2007 年 9 月成功摧毁了 5 个 UXO,IED 目标以及 2 架停放在地面的小型无人机。试验中使用了美国 IPG 光子公司公开销售的 1 kW 掺镱的光纤激光器,采用单发射体二极管抽运,有闭环的水冷系统,射程为 100 m~1 km。另外,其探测系统为前视红外雷达,电源系统为 400 A,24~28 V 的直流电源(由悍马车的交流发电机输出整流后提供)。



图 2 波音公司的“复仇者”武器系统

Fig.2 Boeing laser Avenger

2008 年 12 月,在美国白沙导弹靶场,美国波音公司利用激光“复仇者”武器系统在复杂的山地和沙漠环境中瞄准和跟踪了 3 架小型无人机,并击落了其中的 1 架,这标志着作战装备首次利用激光击落了无人机。2009 年 12 月初,在美国陆军红石兵工厂,波音公司声称激光“复仇者”武器系统又摧毁了 50 种不同的爆炸装置。

3) 利弗莫尔开发采用固体热容激光器的反 UXO,IED 系统。

美国能源部利弗莫尔实验室在成功开发高功率的固体热容激光器后,提出了用激光远程清除 UXO,IED 和地雷的设想。首先用探测设备(例如钻地雷达)判明目标(UXO,IED 或地雷)的位置;然后用脉冲激光照射,使地下水微爆,掘去目标上方的土壤(包括帆布、植

物等其他覆盖物)露出目标;最后利用激光加热、烧穿目标的外壳,使其内部炸药低效爆炸,从而销毁目标。操作员可调整光束功率与光斑尺寸来优化掘土及引爆这两个过程。

脉冲激光具有掘土能力,目标上面掩埋的土壤吸收照射激光的光束能量,并将热量迅速地传导至土壤中少量的水分使其汽化。当土壤的强度承受不住水蒸汽的压力时,将产生微爆炸使土壤喷出。利弗莫尔实验室用 SSHCL(1.5 kW, 3 Hz, 500 J/脉冲)进行了掘土试验,结果如表 1 所示。

表 1 激光掘土试验结果

Table 1 Test results of laser dug

入射角度/(°)	脉冲个数	掘土结果	掘土效率
90	8	形成的坑直径 25 ~ 30 mm, 深约 15 mm	深度 2 mm/脉冲
10	40	形成的掘沟长约 100 mm, 最大宽度 36 mm, 最大深度约 22 mm	平均 1 cm ³ /脉冲

1.2 国内研究现状

我国在激光销毁弹药方面虽然起步较晚,但也在积极跟踪研究,并取得了一些成果。

文献[11]探索了金属背面含能材料的激光点火阈值与规律,研究了光斑尺寸、入射角度、金属与含能材料种类等与含能材料点火的关系。

国内某些研究所对激光扫雷进行了初步探索,但因采用的 CO₂ 激光器太庞大,无法工程化应用而放弃。2007 年 7 月,国内另外两家研究机构^[12]合作,对适用于销毁地雷系统的车载光纤激光器进行了工程化研究,包括引起装药燃烧/爆炸的激光参数阈值,以及光纤激光器销毁地雷的原理性试验。试验采用 0.3 kW 的光纤激光器,射程为 30 m,能穿透壁厚 3 mm 的塑料或金属地雷壳体,点燃 3 mm 厚的混合装药试验地雷平均耗时 20 s。为将射程提至 100 m 左右,目前正在改进设计各分系统,并同时开展千瓦样机小型化研究。

文献[13-14]对激光打孔销毁弹药进行了研究,阐释了其基本原理,分析了激光销毁弹药的研究现状与热点问题。

国内某实验室对激光直接销毁报废弹药进行了探索试验,采用 0.4 kW 连续光纤激光器辐照弹体,研究激光的特征参数与弹体壁厚、材质之间辐照效应的关系,并利用炸药爆发点评估激光辐照弹体作用效果。

2015 年 11 月,国内某研究院在网上报道了其承建的退役小口径航空弹药销毁线开始利用激光技术击发炮弹底火。

2 远程激光智能化排弹关键技术

远程激光智能化排弹系统主要包括高功率激光

器、光束指向控制器、探测系统、标记激光器、电源和冷却模块几部分,此外还应包括确保激光束不会射向其他人员和车辆的混合预测和安全规避系统,以及提供系统控制和记录全部激光活动的智能显示控制系统。系统应解决“看得见、打得着、可控制”的问题。所谓看得见,即探测系统能准确标明目标位置;打得着,则要求激光能到达并能毁伤目标;可控制,就是利用激光引燃而不是引爆危险爆炸物。其关键技术、面临的主要问题、原因及解决途径主要如下所述。

2.1 多传感器复合探测技术

要实现远程激光智能化排弹,前提就是探测到目标的位置,同时为确保激光束不会射向其他人员和车辆,也需探测到作用范围内的保护对象,以便进行预测和安全规避,而不同的探测目标与环境,对传感器的要求也不同。

UXO 的探测设备主要包括合成孔径雷达^[15]、红外探测器、金属探测器^[16]、嗅觉传感器、脉冲热中子仪等。目前主流的研究方法包括磁法探测技术、探地雷探测技术等^[17-18]。磁法探测技术通过磁传感器探测弹丸产生的磁场强度,采用模式识别技术进行 UXO 的搜索与探测;探地雷探测则通过主动发射和接收特定频谱的信号,对地面以下的 UXO 进行定位。在实际应用中,目前国内主要还是通过人工搜索方式进行 UXO 的弹孔定位。

解决的途径是大力研究多传感器复合探测技术,通过融合不同传感器的探测信息,全面清晰构建 UXO、人员、车辆等战场环境,为实现激光远程智能化排弹奠定基础。

2.2 高可靠、紧凑、高能激光器技术

高可靠、紧凑、高能激光器技术是远程激光智能化排弹系统的核心,应具有运行效率高、功率高、功率可调性范围大、可靠性及稳定性高、体积小、环境适应能力强等特点^[19-21]。复杂的地域环境对危险爆炸物销毁的机动性要求日益严苛,因此要在提高功率、减小体积上下功夫。目前,仍然面临一些挑战,包括功率、体积、电力、冷却、材料技术等。

解决的途径有以下几点。

1) 发展基于合束的模块化光纤战术激光武器。

同样的输出功率,光纤激光器的优势明显,包括光束质量、光传递特性、散热特性、可靠性和体积大小等,易于实现高效率和高功率。采用的光纤激光器功率越大,能够销毁的弹药口径越大、弹体越厚、装药感度越低、销毁距离越远、效率也越高。

获取高功率、高亮度激光和远距离传输的有效途径是集成多个光纤激光器组件形成光纤模块化激光

器,利用非相干合成、相干合成或光谱合成技术产生强激光束。理论上而言, N 路光纤激光通过相干合成,远场光斑的峰值强度可实现单路时的 N^2 倍,获得高亮度,并且,相干合成光束具有更好的大气传输效果。这是战术激光武器实现10 kW以上功率量级输出的关键技术。主动相干合成需要非常复杂、昂贵的相位检测和控制装置及其算法;被动相干合成一般利用特殊的耦合结构和器件自组织完成锁相,技术相对简单可靠,但要实现大功率定标放大也有一定难度。

激光器的模块化设计不仅能提高激光武器的作战适用性,使激光束的功率可调性范围大,满足不同任务、威胁需求;而且不易因单个激光器损坏而引起整套系统出现故障,方便维修保障。2009年3月,美国诺斯罗普·格鲁曼公司实现了输出功率15 kW的单模块固体激光器的工程化,7路光束相干合成实现了100 kW功率的输出,可用于击毁空中目标,并于2010年就开始了进场试验。2009年6月,美国IPG公司^[22]研制的单模光纤激光器,输出功率已实现10 kW,能连续工作上万小时。利用单模光纤激光器和非相干合成技术集成了“宙斯”和激光“复仇者”等武器系统。目前,该公司能制造输出功率范围涵盖从1 kW到超过100 kW的大功率光纤激光器,可采用单模和多模方式,具有高稳定性和极长的泵浦二极管寿命^[23]。2013年,德国KLENKE A等^[24]报道了4路百瓦级飞秒脉冲激光相干偏振合成系统,平均输出功率为530 W。2015年10月,美国洛克希德·马丁公司开始为美国陆军生产新一代模块化高功率激光器。2016年,国内某研究所基于主动锁相相干偏振合成系统实现了4路0.5 kW级全光纤窄线宽保偏放大器的共孔径合成输出。当相位控制系统处于闭环状态时,整个合成系统的输出功率达2.164 kW,合成效率为94.5%,这是目前相干偏振合成系统的最高输出功率^[25]。

2) 发展脉冲或复合固体激光器。

目前,国际上普遍采用连续激光工作模式,仿真和试验表明,它存在以下弊端:作战时间长、供电消耗大,对于战略导弹等旋转目标,因无法对准某一点进行烧蚀,无法损伤,因加热表面抗高温能力强的高速飞行器慢,难以有效损伤。

法国圣路易斯法德研究所(ISL)^[26]在2002年发现,采用平均功率15 kW的脉冲CO₂激光(150 J, 2 ms, 100 Hz)照射铝合金板数秒钟就可烧穿出小孔,而采用平均功率30 kW的连续CO₂激光,需要2倍多的时间才能烧出小凹坑。俄罗斯采用钜玻璃长脉冲激光武器,在距离500 m处,击穿了150 mm的钢柱。美国DILAS公司^[27]2012年已研制出波长为766~992 nm、占空比25%、峰值功率1 kW、脉宽10 ms、重频25 Hz、基温45℃的新型军

用高功率脉冲LD。

文献[28]对连续、脉冲以及连续/脉冲复合激光烧蚀钢板的理论和试验进行了对比研究。理论模拟计算和试验表明,与连续激光相比,脉冲激光更有利于快速加热和损伤金属靶材,连续和脉冲复合激光能够获得更好的烧蚀效果。复合激光的烧蚀效果是脉冲激光烧蚀效果的约13倍。上文也介绍了脉冲激光具有掘土能力,因此发展脉冲或复合固体激光器前景广阔。

3) 强激光大气传输及自适应光学技术。

激光远距销毁弹药时,必须综合考虑大气吸收、散射和湍流效应等线性传输效应以及高能激光特有的热晕、光击穿非线性效应,这是进行可行性分析的基础和光学工程设计必须考虑的重要因素。同时,激光器的体制不同,大气传输效应也不同,如激光波长短,衍射效应小,但光学镜面瑕疵影响大;激光波长长,虽然光学镜面瑕疵影响小,衍射却很严重。只有长期坚持测量大气光学特性和深入研究激光在实际大气环境中的传输试验,才能对激光大气传输的线性和非线性效应的特性进行全面掌握。

解决激光大气传输畸变的重要途径是采用自适应光学技术^[29],它通过调整快速倾斜镜和变形镜以及波前校正器和控制技术来纠正光束的扩展和畸变,从而提高光束质量。

2.3 激光与危险爆炸物作用机理研究

激光对材料的毁伤作用主要包括热破坏、力学破坏和辐射破坏。对危险爆炸物而言,一般认为激光作用以热破坏效应为主。在这方面,国内研究对激光与裸露装药的相互作用关注较多,对激光与带壳装药,特别是激光直接销毁危险爆炸物的作用机理研究关注较少。下一步要着重加强这方面研究,特别是不同环境条件下激光的特性参数(包括功率、入射角度、光斑尺寸、作用时间等)与危险爆炸物(包括种类、材质、部位、壁厚等)引燃的关系,关键是要弄清楚激光引爆与引燃危险爆炸物的临界条件。

3 结束语

远程激光智能化排弹技术应解决“看得见、打得着、可控制”的问题,其关键技术涉及多个领域,应用广泛。鉴于该技术在我国还处于初级应用阶段,因此,应做好以下3点工作:1) 统筹规划,搞好顶层设计;2) 集思广益,突破关键技术;3) 稳妥推进,拓展应用领域,引导和推动我军激光远程智能化排弹技术发展和应用。

参考文献

[1] 董三强,冯顺山,余文力. 武器弹药终点未爆安全设计

- 的现状及探讨[J]. 飞航导弹, 2008(9):48-51.
- [2] 范志锋,高欣宝,文健. 大口径未爆弹销毁安全距离研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(1):73-76.
- [3] 任国光. 反未爆弹药和简易爆炸装置的激光武器[J]. 激光与红外, 2009, 39(3):233-238, 243.
- [4] 许栩,黄德雨,李诚刚,等. 未爆弹排除技术现状及发展趋势[J]. 机电技术, 2015(5):153-154, 160.
- [5] COFFEY V. High-energy lasers; new advances in defense applications[J]. Optics & Photonics News, 2014, 25(10):28-35.
- [6] EXTANCE A. Laser weapons get real[J]. Nature, 2015(521):408-410.
- [7] 龚钰哲,岳松堂,杜浩宁. 2015 年度外军陆军防空反导装备发展综述[J]. 现代军事, 2016(3):53-58.
- [8] Wikipedia. ZEUS-HLONS (HMMWV laser ordnance neutralization system) [EB/OL]. [2017-03-12]. [https://en.wikipedia.org/wiki/ZEUS-HLONS_\(HMMWV_Laser_Ordnance_Neutralization_System\)](https://en.wikipedia.org/wiki/ZEUS-HLONS_(HMMWV_Laser_Ordnance_Neutralization_System)).
- [9] Parsons. ZEUS laser neutralization system[EB/OL]. [2012-01-01]. <https://www.parsons.com/Media%20Library/ZEUS-Laser-Neutralization-System.pdf>.
- [10] Wikipedia. Boeing laser avenger [EB/OL]. [2017-08-24]. https://en.wikipedia.org/wiki/Boeing_Laser_Avenger.
- [11] 王伟平,谭福利,张可星,等. 激光对金属背面含能材料的点火阈值[J]. 激光技术, 2001, 25(3):199-202.
- [12] 李伟,赵勇,陈曦,等. 大功率光纤激光器在销毁弹药中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(7):39-42, 65.
- [13] 宋桂飞,李成国,王韶光,等. 激光销毁弹药若干问题的研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(9):932-935.
- [14] 宋桂飞,李良春,王韶光,等. 激光销毁危险爆炸物应用研究进展[J]. 激光与红外, 2014, 44(10):1075-1078.
- [15] SCHREIBER E, PEICHL M, HEINZEL A, et al. Challenges for operational use of ground-based high-resolution SAR for landmines and UXO detection [C]//Proceedings of 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2016:834-837.
- [16] 刘鹏,张宝华,姜成鹏. 机动式危险品弹药处置与运输关键技术研究[J]. 科技信息, 2013(34):238, 296.
- [17] 张亚辉,王玉龙,刘皓挺,等. 一种基于终点弹道气动噪声及落地声分析的未爆弹探测技术[J]. 兵工学报, 2015, 36(8):1525-1532.
- [18] 方涛,张建军,付成群,等. 复频探地雷达在未爆弹探测中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(3):244-247.
- [19] WILSON J R. Laser weapons at the crossroads[J]. Military & Aerospace Electronics, 2015, 26(11):6-14.
- [20] CARROLL D. Overview of high energy lasers: past, present, and future? [J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2015, 32(7):1438-1440.
- [21] 宗思光,吴荣华,曹静,等. 高能激光武器技术与应用进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(8):152-161.
- [22] Laser Focus World. IPG photonics offers world's first 10 kW single-mode production laser [EB/OL]. [2009-06-17]. <http://www.laserfocusworld.com/articles/2009/06/ipg-photonics-offers-worlds-first-10-kw-single-mode-production-laser.html>.
- [23] IPG Photonics. High power CW fiber lasers [EB/OL]. [2017-10-19]. <http://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/high-power-cw-fiber-lasers>.
- [24] KLENKE A, BREITKOPF S, KIENEL M, et al. 530 W, 1.3 mJ, four-channel coherently combined femtosecond fiber chirped-pulse amplification system[J]. Optics Letters, 2013, 38(13):2283-2285.
- [25] 马鹏飞,王小林,粟荣涛,等. 2 kW 级光纤激光相干偏振合成[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(4):4-5.
- [26] HUGENSCHMIDT M. Optronics-laser-sensories [J]. Directed Energy Systems, 2002(9):18-19.
- [27] PATTERSON S, KISSEL H. Advancements in high-power diode laser stacks for defense applications [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012, 8381:11.
- [28] 程勇,郭延龙,唐璜,等. 战术激光武器的发展动向[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11):33-43.
- [29] MADEC P Y. Overview of deformable mirror technologies for adaptive optics and astronomy [J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2012, 8447:5.