

美国高能激光武器的发展战略(上篇)

任国光 黄裕年

(北京应用物理与计算数学研究所,北京,100088)

摘要: 首先介绍了美国高能激光武器的发展战略和高层技术路线(上篇)。然后分别评述了近一年来机载战区激光武器、战术高能激光武器和机载战术激光武器、天基激光武器、地基激光反卫星武器和舰载激光武器取得的重大进展,分析和讨论了它们面临的技术挑战和可能采取的对策(下篇)。

关键词: 高能激光武器 化学氧碘激光器 氟化氢化学激光器 二极管泵浦固体激光器 自由电子激光器

Developing strategic of American high power laser weapons(part 1)

Ren Guoguang, Huang Yunian

(Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100088)

Abstract: This paper describes the developing strategy and high-level roadmap of American high energy laser weapons. The significant progress of various laser weapon systems developed in the last year is reviewed. And finally, the technical challenges and possible measures are discussed and analyzed.

Key words: high energy laser COIL HF/DF chemical laser DPL FEL

引 言

军用高能激光器不仅是防御性武器,用于战略防御,战区防御和战术防空方面,它还是很有前途的进攻性武器,特别是用作反卫星武器、精确打击武器和非致命武器。激光武器以光速攻击目标的独特性能将使未来战场发生革命性变化,它将成为 21 世纪的重要武器之一。

自 1960 年世界上首台激光器问世以来,激光武器技术经过近 40 年的发展,已为当今一些最具挑战性的武器应用作好了准备。采用化学激光器的第一代激光武器将于本世纪头 10 年内部署,同时也正在积极发展采用高效能激光器的第二代激光武器技术。最近几年来,高能激光武器技术获得了迅猛的发展。包括化学氧碘激光器(COIL)在内的一些机载激光武器系统的硬件正在制造或已制造出来,机载激光的第一个平台(波音 747-400L)已制造完毕,并开始进行改装,2001 年将开始安装 COIL 和束控系统。美国已向空间武器迈出了一步,开始发展天基激光空间演示器。美-以联合研制的战术高能激光武器系统,在完成了各分系统的试验后,目前正在白沙导弹靶场作拦截火箭弹的演示试验。高能激光武器在获得迅猛发展的同时,这种新概念武器也面临着一些技术上的挑战。有关强激光武器技术的发展,我们已作过分析和评述^[1],这里,将分上下两篇评述美国高能激光武器的发展战略及最近一年多来取得的重大进展,分析和讨论面临的技术挑战和可能采取的对策。

1 美国发展高能激光武器的战略和高层技术路线

1.1 发展战略

每种激光装置都具备各自特有的性能,能完成一种或多种作战任务,不存在什么万能的激光器。美国发展高能激光武器的战略是同时保持几项强激光武器计划,以完成不同的战略、战区和战术任务。1993 年以来,美国把高能激光

武器的重点转向了战区和战术任务(表 1),计划采用技术较成熟的化学激光器在 21 世纪初部署第一代普通型激光武器。同时积极发展采用高效能激光器的下一代节能型激光武器技术,为高能激光武器的持续发展打好基础。

从美国国防部的防御技术领域计划可以清楚地看出,COIL 和 HF 化学激光器是美国第一代激光武器的骨干,而二极管泵浦固体激光器,相控阵二极管激光器和自由电子激光器是下一代新型激光器^[2]。为了探索未来高能定向能技术的发展路线,国防部最近增加了高能激光系统试验装置的工作,重点发展高功率自由电子激光器和固体激光器作为各种化学激光器发展计划的补充。评估和发展高能固体激光器和其它定向能技术,评估海军的自由电子激光器计划^[3]。陆军空间和导弹防御司令部作为国防部的执行机构,将负责高功率固体激光器和具有潜在武器应用的定向能技术的发展工作。现已建立了有利弗莫尔实验室和工业界参加的高功率固体激光器国家发展中心。第一步将研制 100kW 的二极管泵浦固体激光器^[4],其关键技术

表 2 普通型和节能型战术激光武器方案比较

	普通型方案	节能型方案
目标上的光斑直径	10~20cm	1~2cm
目标辐照度	3~7kW/cm ²	10~20kW/cm ²
杀伤能量密度(假设)	5~10kJ/cm ²	10~20kJ/cm ²
交战时间	0.7~1.5s	0.7~1s
杀伤能量	0.5~2MJ	20~40kJ
激光器功率	0.5~1.5MW	20~40kW
杀伤距离	4~6km	1~2km
激光强度	1~1.5×10 ¹⁵ W/	2~4×10 ¹⁴ W/
波长	3.8μm 或 10.6μm	1.06μm
光束定向器直径	35~45cm 或 80~120cm	15~25cm
光束质量	2~3 倍衍射限	1.1~1.3 倍衍射限
跟踪抖动	5~8μrad	2~4μrad

是固体热容量光激射。2000 年 3 月 24 日美国国防部发表并向国会提交了“国防部激光总计划”,这个按国会要求,由国防部高能激光评审委员会经过 6 个月研究完成的研究报告,评审了涉及发展美国高能激光武器系统所有的研究、发展、试验和评估工作。报告断言:“激光有潜力成为 21 世纪巩固美国国家安全利益的主要武器技术之一”。评审委员会在给定的作战任务参数内,评估了各类高能激光器摧毁目标的能力和潜在效能,发现由国防部投资的 3 种激光装置技术——化学激光器、固体激光器和自由电子激光器——都能达到高的功率和光学质量。虽然每种激光器都有各自的缺陷,但在这些技术领域内有专门的科学和技术计划解决这些问题^[5]。

虽然高能激光器应用于武器经历了许多失败,但是光束质量和高功率是关键。光束质量是激光器能多么有效地把它的光射入靶上希望的光斑尺寸内的量度。对高能激光武器而言,

表 1 美国高能激光武器的应用

进攻或防御	应 用	目 标	困难程度
防御武器	国家导弹防御	弹道导弹	非常困难
	战区导弹防御	弹道导弹	中等难度
	面或点防御	巡航导弹、火箭、飞机 迫击炮、火炮	难度较小 非常困难
	平台防御	巡航导弹	难度较小
进攻武器	机载精确打击	飞机、地面车辆	难度较小
	非致命性武器	飞机、地面车辆	难度较小
	反卫星	卫星	中等难度

好的光束质量往往与高功率同样重要。由于对目标进行致命杀伤所需的能量密度是与波长的平方成反比,与目前正在发展的普通型第一代激光武器相比,节能型激光器将采用波长更短的新一代激光器(表 2),使光束以低的发散度将能量准确地射到目标上的最佳光斑尺寸内,从而获得更大的能量效率,这就是下一代节能型激光武器的概念。

美国 30 多年来武器用高能激光器由长波长转向短波长的事实,充分说明了高能激光器的这一发展趋势。美国空军科学顾问委员会的研究报告指出,未来可用于节能型激光器的短波长激光器有二极管泵浦激光器($1.06\mu\text{m}$),相控阵二极管激光器($0.8\mu\text{m}$),化学氧碘激光器($1.315\mu\text{m}$)和氟化氢泛频激光器($1.35\mu\text{m}$)^[6]。

当然,短波长的光受衍射效应的影响小,但它受器件光学缺陷和大气效应的影响较大。然而已经证明采用自适应光学和相位共轭技术可以消除大气湍流和光学元件缺陷造成的影响,获得几乎理想的光束或在有严重光学畸变的情况下成像。最近在白沙靶

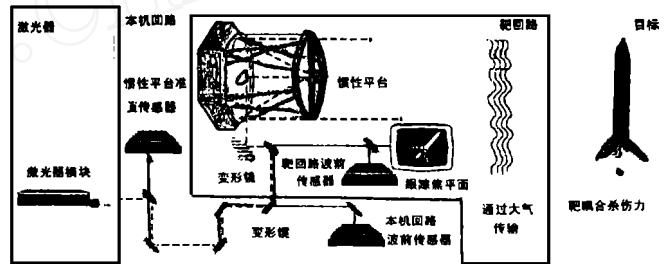


图 1 高能激光武器系统的示意图

场进行的激光大气补偿试验中,在强湍流情况下激光沿水平路径传输 51km 后,经自适应光学补偿的光斑比未经补偿的光斑减小了 5~20 倍。另一个例子是空军 3.5m 直径自适应光学望远镜的首次实验结果表明,经补偿的峰值光强比未补偿的峰值光强提高 65 倍,Strehl 比达到 0.5。显而易见,由于光束质量在激光武器中的重要性,在大多数高能激光武器系统中都将采用这两项技术(图 1),因为它关系到激光武器的成败。

1.2 关键技术与高层发展路线

为了实现高能激光技术应用于进攻性和防御性武器,美国防部的报告列出了 6 项关键技术及其高层发展路线。(1) 固体激光器(陆军):研制和演示相位相干的光学纤维阵列;将热容量激光器定标放大到 100kW;发展低成本的二极管。(2) 化学激光器(空军):改进高度优先的激光器装置(COIL 和 HF/DF 系统),包括建模和模拟;生产战术闭路循环的 COIL,DF,评估机载战术激光装置,建造电动 COIL,考察 DF;评估电泵浦的新颖混合方法(二极管泵浦氧碘激光器,电泵浦氧碘激光器)。(3) 自由电子激光器(海军):研制高平均电流注入器;研制高功率共振器/摇摆器;研究高平均电流电子束传输。(4) 光束控制(空军):发展部件,包括照明器、传感器、反射镜和镀膜等;继续发展光学部件和镀膜的测量技术;继续进行实验性试验和集成试验。(5) 杀伤力(空军):阐明脉冲与连续效应的优点;加强杀伤机理的建模和模拟工作;评估电-光探测器的易损性和战斗损坏。(6) 先进技术(陆军):发展支持全功率的中继镜技术;考察飞秒激光效应和装置;研究新型固体激光器材料。

美国防部目前重点投资的长期技术领域,包括闭路循环的化学激光装置,固体激光器,先进的束控和提高光束质量的技术,以及杀伤力评估。

2 战术高能激光武器和机载战术激光武器

2.1 战术高能激光武器

2.1.1 美-以联合研制的战术高能激光系统拦截试验获得成功 美-以联合发展的战术高能

系统在 1996 年完成杀伤力试验后,经过 4 年的努力,该系统从 2000 年 5 月开始在白沙导弹靶场进行拦截“喀秋莎”火箭弹的试验,在 6 月 6 日的试验中,它成功地将一个正在飞行的喀秋莎火箭弹头击落(如图 2)。在 8 月 28 日的试验中,该系统又同时击落了两枚齐射的喀秋莎火箭,演示了它击落多枚火箭的能力。

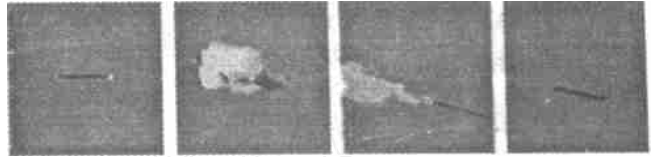


图 2 战术高能激光系统击落喀秋莎火箭弹序列照片

这个耗资 2 亿 5 千万美元的系统只是用于防御短程火箭,而且是在一个固定的平台上作战,所以,它不需要什么更先进的技术,而且所

用的小型 DF 化学激光器是早在星球大战计划以前就工作过的类型。以色列国防军原计划在北部边界总共部署 13 个战术高能激光武器系统,防御黎巴嫩游击队的 122mm 喀秋莎火箭炮。但由于这种系统的能力有限,无法对付数量远远超过自己的火箭弹,故它并不能有效地解决喀秋莎火箭攻击的问题。最近以色列国防部官员表示,将寻求更好地激光导弹防御系统^[7]。

2.1.2 美国陆军将发展机动战术高能激光武器系统 根据美国陆军的定向能总计划,陆军将发展机动的战术高能激光(MTHEL)系统。除陆军外,海军陆战队和以色列也对机动系统感兴趣。目前 MTHEL 系统还处在概念研究阶段,在武器系统概念描述、技术发展计划、成本、日程和风险等方面展开研究。未来可能发展 3 种 MTHEL 系统,分别用于以色列,韩国和美国。

用于以色列的 MTHEL-1 型,将由美-以发展的战术高能激光系统的几个火力单元组成,并包括它的作战管理,以及指挥、控制、通信、计算机与情报系统,可能于 2005 年部署。用于韩国的 MTHEL-K 型,将在 MTHEL-1 型的基础上提高火力,以对付齐射的 240mm 火箭弹和火炮炮弹,用于保护地面部队,可能于 2007 年部署。MTHEL-K 和 MTHEL-1 是中、近期的机动系统,从其用途来看估计不会采用什么新技术,只是将目前美-以的战术高能系统车载化,或许稍有提高。

用于以色列的系统仅仅是防御恐怖分子用 BM-21 火箭炮(122mm)的攻击,因而射程短、作战目标单一、作战能力很有限。而美国面临的是世界范围内的威胁,要求防御短程导弹、巡航导弹、武装直升机和无人驾驶飞行器。并且系统是高度机动化的,系统的规模应能用 C-130 运输机在战区内转移,并必需能随被保护的机动部队转移。显然现在用于以色列系统的技术是无法满足这些要求的。因此,必须把创新的高能激光武器技术(如新型激光器和大气补偿)和其它新概念引入高能激光防空武器,以提供新的防空和反导能力。这种系统预计将于 2015 年完成。目前考虑的激光器有 DF 化学激光器,COIL 和 DPL。最近,负责此计划的陆军空间和导弹防御司令部司令 John Costello 表示,希望进一步提高系统的能力,计划发展“电供电高机动多用途轮式车辆”(HMMWV)原型,“我们估计大约在今后 5~6 年,HMMWV 将产生足够的功率,使我们能把固体激光器安装在 HMMWV 上。你不可能获得比它更轻和更强有力的系统”^[8]。显然,陆军想把未来车载战术激光防空武器的重点放在 DPL 上。

2.2 机载战术激光武器

2.2.1 美国国防部研究用机载战术激光摧毁地面目标 美国国防部最近的研究认为机载战术激光将是快速发展的一种武器。它能用作致命武器或非致命武器,用以对付战术、作战和战略目标^[9]。作为致命武器,它可以击落贴地巡航导弹,掠海反舰导弹和短程火箭。作为非致命武器,它能迅速地使敌方的各种武器系统和装备失效。为了加速战术机载激光武器的发展,

国防部准备把它列为 2001 年的先进概念技术演示项目。由于机载战术激光武器要比车载系统更加机动,所以,我们认为未来的机动型高能战术激光武器,很可能是一种空射型的定向激光系统。

战术机载激光武器的概念是把一台 300kW 的化学氧碘激光器装入 V-22 倾转旋翼机、CH-47 支奴干人直升机、AC-130 直升机,甚至一辆 5t 的卡车或陆军未来的作战系统里。战术机载激光系统重 4.5 ~ 6.8t,这取决于最后的需求。这个系统用于地-空作战,射程是 10km;用于空-空或空-地作战,射程是 20km。针对不同的目标,操作人员可以转动调节盘,选择激光照射时间和激光功率的大小,获得所期望的杀伤效果。

一般来说,激光比较难于攻击地面目标,但有些目标极易受到热损伤,并且值得用激光进行攻击,例如地基雷达、指挥车、武器装备上的传感器、通信线路和电力线路、地面上的飞机以及士兵。联合非致命武器局局长 Fenton 举例说,战术机载激光在 40s 内可损伤 32 个轮胎、11 副天线、11 个电-光器件、3 个导弹发射架、4 门迫击炮、5 挺机枪或 22 名武器士兵。非致命应用对战场司令官已变得非常重要,因为他们越来越多的面临需要作出灵活选择的战斗任务。

2.2.2 波音公司完成机载战术激光器试验 机载激光技术最初由空军研究实验室开发,现在正由波音小组发展用于空军的机载激光计划。波音公司借用这项技术,最近完成了一种新型战术 COIL 的原理论证试验。与现有的 COIL 相比,新的战术 COIL 选择的最佳参数为功率 100 ~ 500kW,近地面工作,而且不排出废气。战术 COIL 技术首次使激光武器系统成为高度机动和自封闭的系统。

这种创新的化学氧碘激光器技术使激光武器具有战术机动的作战能力。中等功率的激光器填补了现有机载激光计划和天基激光计划中使用的庞大激光器,与未来用电驱动的固体激光器之间的空白。虽然对中等功率激光器的需求刚刚出现,但这种武器对近距离杀伤和非致命性作战很有吸引力。因而“国防部激光总计划”要求对高能激光器技术在中等功率系统的近期应用给予新的投资。

作原理论证的 COIL 输出功率为 20kW,试验在很宽的工作范围内探索了 COIL 的性能,试验数据确定了激光器的总效率。在试验中,压力恢复系统采用低温吸附真空泵,激光器排出的气体全部被收集到这个小的密封排气系统中,而无废气排入大气^[10]。因 COIL 排出气体的温度仅稍高于环境温度,且其所需的压力正好在粗选沸石泵浦的能力之内,所以,可以采用这种小型密封排气系统。试验证实密封排气系统能满足按比例放大到战术 COIL 武器的要求,其实低温吸附真空泵使用于 COIL,已在洛克达因公司的大型 COIL 装置上成功地试验过了。

除了需要研究稠密大气层的大气补偿外,300kW 的激光模块和其它的一些部件都是现成的,剩下的问题是如何把这些部件一体化,并安装在平台上。V-22 鱼鹰倾转旋翼机垂直起飞载重 5.4t,短距起飞载重 9t,若机载战术激光武器系统达到 5t(如上节所述),则重量不成问题。若用小型低温吸附真空泵代替常用的气体引射器,则体积也可能不成问题。波音公司说在两年内能建成功率为 300kW 的轻便型战术 COIL 装置,它能装入一架旋翼机或一个标准的航运集装箱。

参 考 文 献

- 1 任国光,黄裕年. 激光技术,1999;23(4):193
- 2 1997 DOD Defense Technology Area Plan, Director of Defense Research and Engineering

Nd YAG 激光用于热交换管的现场修复

彭 云 陈武柱

Kim Jae-Do

(清华大学机械工程系,北京,100084)

(仁荷大学机械工程系,仁川 402-751,韩国)

摘要: 介绍了可用于受损管件现场修复的内衬管环形 Nd YAG 激光深熔焊结构及装置。内衬管设计成内凹状,以减小轴向变形拘束度,降低焊接残余应力,从而降低应力腐蚀倾向。光导纤维将激光导入内衬管内,旋转斜面镜将激光反射到内衬管内壁并产生一深熔环形焊道。熔化金属凝固后将内衬管与外管连接在一起,并防止液体渗入损坏的外管部分。实验结果表明,激光焊母材热影响区晶粒长大较小,激光脉冲峰值影响焊缝连接宽度,而连接宽度影响拉伸剪切强度。焊接接头的拉伸剪切强度约为 Inconel 600 管拉伸强度的 62%。

关键词: Nd YAG 激光 脉冲焊接 热交换管 内衬管

On-site repair of heat exchange tubes with Nd YAG laser

*Peng Yun, Chen Wuzhu, Kim Jae-Do**

(Dept. of Mechanical Engineering, Tsinghuan University, Beijing, 100084)

(*Dept. of Mechanical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea)

Abstract: In the paper, the composition and equipment for on-site repair of damaged tubes by circular Nd YAG laser deep penetration welding of inner sleeves are introduced. The inner sleeve is designed to be concave to reduce their axial constraints so that the residual stress of the welded part can be reduced and the tendency of stress corrosion can be decreased. Laser light is transmitted into the inner sleeve through an optical fiber, then reflected by a rotating mirror onto the inner wall, finally a circular weld of deep penetration is produced. The melted metal connects the inner sleeve with the outer tube, and prevents liquid seeping to the damaged part of the tube. Experimental results indicate that the grain growth of heat affected zone of parent metal caused by laser welding is small, the connection width is influenced by pulse power and that the tensile shear strength is influenced by pulse power and that the tensile shear strength is influenced by connection width. The tensile shear strength of the welded joint is about 62% of the tensile strength of Inconel 600 tube.

Key words: Nd YAG laser pulsed welding heat exchange tube inner sleeve

- 3 Dupont G. Inside the Pentagon, 1999-06-03:11
- 4 Tirpak A. Air Force Magazine, September 1999-09:52
- 5 Department of Defense Laser Master Plan. High Energy Laser Executive Review Panel, 2000-03-24
- 6 McCall G H. New World Vistas: Air and Space Power for 21th Century, USAF Scientific Advisory Board.
- 7 Opall- Kome B, Ratnam G. Defense News, 2000-09-19:4
- 8 Gonrley S. Jane's Defense Weekly, 1999-10-27:4
- 9 Seffers I. Defense News, 2000-04-10:1
- 10 Vetrovec J. SPIE, 2000:3931:60

作者简介:任国光,男,1938 年出生。研究员。现从事激光技术发展战略研究工作。

收稿日期:2001-02-19