

激光技术在加工工业领域和军事领域的发展与应用

Development and Application of Laser Technology in Machining Industry and Military Industry

中航工业北京航空制造工程研究所 李忠建 崔 丽

随着激光技术的不断发展,激光技术在工业加工、航空航天、国防武器装备领域的地位日益提高,需要一方面积极地进行新型激光器研制和激光应用的探索,另一方面加快激光器件的工程化进程,将科研成果迅速地转化到应用领域,研制出效率高、性能稳定、易于操作维护、平台适应性强的激光器件。

1960年,美国休斯研究实验室的梅曼制成了世界上第一台激光器,经过数十年的发展,出现了各种类型激光器,包括化学激光器、气体激光器、自由电子激光器、固体激光器、光纤激光器等。输出功率从最初的毫瓦量级发展到千瓦量级,在工业、科研、国防等领域获得了广泛的应用。在工业领域,激光制造已成为不可或缺的重要手段,已经获得应用的包括激光焊接、激光切割、激光打孔、激光表面处理、激光合金化、激光熔覆、激光快速原型制造、金属零件激光直接成形等数十种激光技术,与传统的加工方法相比,具有高能密聚焦、易于操作、高柔性、高效率、高质量等突出优点。在国防领域,已普遍获得应用的技术包括激光测距、激光干扰、激光制导、激光致眩、激光干扰等,高能激光反导、激光打击等也展现出光明的前景,由于激光武器具有反应迅速、抗电磁干扰能力强、作战使用费效比低、连续作战时间长等特点,正

成为国防装备的重要组成。

工业应用

1 激光冲击强化技术

激光冲击强化(Laser Shock Peening)是利用强激光束产生等离子冲击波,在金属部件的表面产生有益的残余压应力,提高金属材料的抗疲劳、耐磨损和抗腐蚀力。波长为 $1\mu\text{m}$ 、脉宽为十几ns的高能激光束通过加工件表面的约束层,照射到加工件表面的吸收层时,吸收层吸收激光能量后发生爆炸性汽化蒸发,产生高温、高压等离子体,由于约束层的存在,等离子体膨胀受限,压力迅速升高,产生高压冲击波,作用于加工件表面并向内部传播。由于这种冲击波压力高达数GPa(10^9Pa),超过加工件的材料动态屈服强度,因此表层不产生应变硬化,产生屈服和塑性变形,塑性变形区域的残留应力很大,同时,微观组织发生很大的变化,从而显著提高了加工件的抗疲劳、耐

磨损和抗腐蚀力^[1]。

1972年,美国巴特尔学院的B. P. Fairand等人首次利用高能脉冲激光对7075铝合金进行冲击强化,结果表明其屈服强度提高30%。自此,世界各国纷纷开展了有关激光冲击强化技术的研究。

激光冲击强化的典型应用是航空发动机叶片的强化^[2]。1994年12月,美国开始实施“航空发动机高循环疲劳科学和技术计划”,旨在帮助消除飞机涡轮发动机的高循环疲劳,避免飞行故障,劳伦斯·利弗莫尔国家实验室、通用电气公司、麦锡金属表面处理公司等机构联合深入开展了激光冲击强化技术的理论、工艺和设备的研究,激光冲击强化技术逐步走向实际应用。随着技术的不断进展,激光冲击强化推广应用到众多战斗机、大型客机的发动机的风扇/压气机叶片上^[3]。目前,激光冲击强化技术已经全面用于Trent系列航空发动机叶片的制造。

2 飞秒激光加工技术

飞秒激光加工技术也称为超快激光加工技术,其最大特点是激光脉冲宽度窄,一般为几十上百飞秒(10^{-15} s)。飞秒激光加工技术的一个主要应用是微孔加工,由于飞秒激光脉冲很短,远小于晶格热传导时间,其能量吸收严格限制在极小范围内,因此,对加工部位的周边影响很小,具有高精度、重铸层小、无周边损伤等特点(见图1)。

20世纪80年代,飞秒激光器在美国问世,飞秒激光技术得到了迅猛发展。随着飞秒激光钛宝石激光器的研究成功,飞秒激光器进入了加工领域。1996~1997年,德国汉诺威中心进行的一系列实验表明,飞秒激光脉冲下金属热扩散所起的作用明显降低,为精密微加工提供了有力手段^[4-5]。飞秒激光技术的应用之一是工件打孔,由于航空发动机涡轮叶片的工作温度超过 1000°C ,因此在叶片上加工大量直径数百 μm 的微孔进行冷却,以往利用电火花技术,改用高重复频率飞秒激光在叶片上进行微孔加工,大幅提高了加工质量和工作效率。

激光熔覆技术、3D打印以及其他

激光熔覆是先通过一个喷嘴将粉末材料或添加材料涂覆到基材表面,然后在激光束的扫描下,这些材料在基材表面发生烧结或熔化,形成涂层。激光熔覆技术可以追溯到20世纪70年代,进入80年代激光熔覆技术已经发展成为表面工程、摩擦学、应用激光等领域的前沿性课题;而到90年代后,相关科学研究与应用开发得到快速发展。与热喷涂等传统的涂层技术相比,激光熔覆技术提供了真正的冶金熔合优势,能产生更高质量的涂层,同时又能避免一些常见的缺陷,通过使用多个粉末储料器,能够将不同的粉末混合在一起,

满足特定的涂层需求。激光熔覆技术还主要用于对零部件的损伤部位进行修复(见图2)。

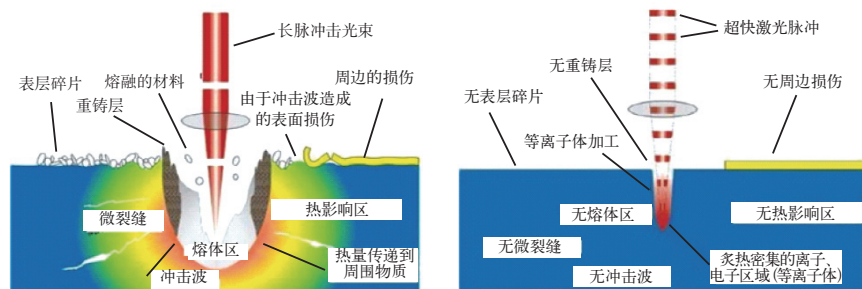


图1 飞秒激光打孔

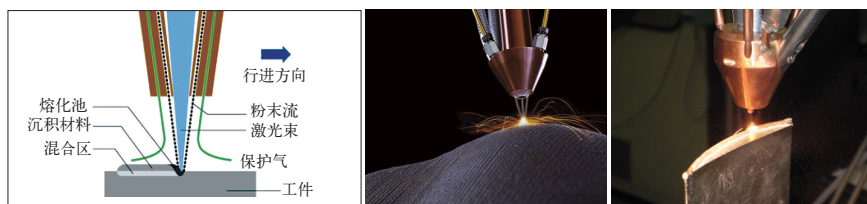


图2 激光熔覆焊



图3 激光3D打印

激光3D打印技术是快速成型技术的一种,基于材料堆积法的一种高新制造技术。依据计算机3D图纸,将金属或聚合物等逐层进行烧结,形成一个平面形状,再通过层层累积叠加,形成一个立体物体。采用激光3D打印零部件,材料利用率高达80%,其性能超过或等同于传统方法加工出的零部件,耐高温性、持久性、抗疲劳性能比锻件表现优异。2012年,美国投资10亿美元成立15个制造创新中心组成网络,“增材制造”为其中的一个首选研究方向。在先进战机、大型飞机、高推重比航空发动机、重型燃气轮机等装备的研制生产中具有重要的应用前景(见图3)。

激光技术还广泛应用在切割、焊

接、船舶除锈等领域^[6],可以说,激光制造已渗透到航空航天、汽车轮船等工业加工各个领域(见图4)。

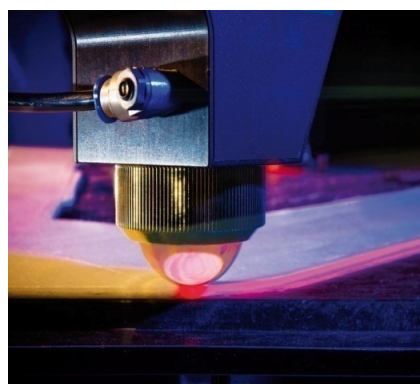


图4 激光透射焊接玻璃纤维增强塑料

在军事领域的应用

激光武器是利用激光辐射能量达到摧毁作战目标或使其丧失战斗力的作战武器,作为一种定向能武器,激光武器正朝向实战装备阶段发

展。激光武器基本组成及工作过程原理为,首先,由雷达系统搜索目标并将目标引导到激光武器跟踪瞄准分系统的视场内,由跟踪瞄准分系统进行目标锁定。控制分系统发射指令使激光器发射激光,判定攻击效果并停止发射激光。

根据对目标作用效果的不同,激光武器可以分为软杀伤和硬杀伤两种方式;从作战目标角度,激光武器可以分为战略激光武器和战术激光武器两类。战略激光武器的作战目标主要为卫星、战略导弹等战略武器目标。战术激光武器的作战目标主要为飞机、战术导弹、地面车辆和人员等。激光武器可搭载平台和类型众多,根据搭载平台,可分为地基、车载、舰载、机载以及天基高能激光武器。

1 软杀伤型激光武器

软杀伤(soft kill)主要利用高峰值功率激光破坏对方导弹、探测器等设备上的光电传感器、光电系统,损伤红外热像仪和红外制导导弹导引头,对敌方人员致盲/致眩^[7](见图5)。软杀伤型激光武器对激光器功率要求不高,但已经成为压制光电精确制导武器、光电侦察系统等威胁的有效对抗方式,很多国家已经装备军队,并有多次实战经历。



图5 绿光致盲致眩系统

在1982年英阿马岛海战中,英军就在其舰船上安装了DEC激光眩目瞄准镜,照射阿根廷飞机,用来致眩阿方飞行员,使之观测不到目标,丧失作战能力。美国目前已装备或正在研制多种软杀伤型激光武器,主

要有AN/PLQ-5、Stingray激光武器系统、Outrider车载激光致盲武器系统、Coronet Prince机载激光系统等^[8-9],基本均具备能够探测和破坏光电传感器、致盲/致眩人眼的功能。

2 硬杀伤激光武器

硬杀伤(hard kill)是利用强激光对目标本体的瞬间烧蚀、加热和冲击作用,破坏目标的组织结构或摧毁进攻武器使其失去作战功能,作战目标包括各种类型的导弹、无人机、地面车辆等。从20世纪60年代起,美军就开展了一系列硬杀伤激光武器项目研究,从早期的气体激光器、化学激光器、自由电子激光器到固体激光器,目前,美国军方已经开展了数个与固体激光器相关的项目。

1994年,美国空军开始ABL项目。指标作战距离大于460km,武器系统总重45t,载机波音747-400F运输机。2010年2月在试验中成功摧毁了一枚处于助推段的探空火箭,一枚液体燃料弹道导弹,整个过程为时不到2min。由于系统复杂、庞大笨重,化学燃料费用高、污染大、成本高昂等原因,2011年底,ABL项目下马,但通过该项目的实施,充分验证了机载激光武器打击空中和地面目标的潜力,美国在机载高能激光武器的目标搜索与跟踪、激光大气传输补偿、抖动控制和高能激光束管理等技术领域取得了一系列重大进展,为研制技术更加先进的新型机载激光武器奠定了坚实的基础。

联合高能固体激光器(JHPSSL)项目由高能激光联合技术办公室、美陆海空三军联合投资,诺·格公司全程参与了研制竞标工作。2009年底,该公司的基于ZigZag板条结构的多放大链相干合成激光器达到了100kW^[10-11],连续运行时间超过6h,但由于一系列工程化问题,该激光器尚未进行靶场试验。但诺·格公司以ZigZag单放大链结构为原型,开发出一系列10kW级激光器模块,

2011年4月,安装在水面舰艇上的诺·格公司的固态激光器击毁了一艘小型目标船只,验证了激光武器应用到海上舰艇自卫的可行性。2012年,公开了Gamma军用激光器,输出功率为13.3kW,光束质量为1.4,近衍射极限;重量为500磅,体积为23英寸×40英寸×12英寸,大约为2个微波炉的体积。

高能液体激光防御系统(HELLADS)项目隶属美国国防部高级研究计划局(DARPA)(见图6),研制商为通用原子航空系统公司。旨在演示一台150kW的激光武器,该武器重量低于907kg,其体积和重量仅相当于当前研制的试验性激光武器的十分之一,美国空军计划装配战斗机和轰炸机装备,美国海军准备2014年底测试小型舰载激光武器。该激光器基于通用原子公司自有的分布式薄片激光器专利^[12],为该项目研制的激光器包括两个模块,单个模块产生75kW激光输出,目前该项目进行到了最后的开发阶段,正研制第二个模块,将与第一个模块组合产生150kW激光。

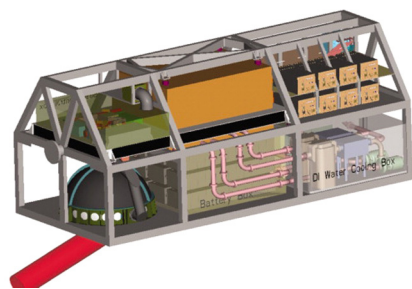


图6 液体激光器系统集成示意图

2013年5月间,洛·马公司演示了高能激光器移动演示(HELM)项目的区域防御反导弹系统(ADAM:主要用于作战基地等高价值设施的近距离防御(见图7))系统,采用10kW光纤激光器从1.5km外击落了类似“卡桑”火箭弹的目标^[13]。同年4、5月间,该激光武器样机在1.5公里距离摧毁了8枚自由飞行的小口径火箭弹。



图7 洛·马公司演示ADAM系统对火箭弹的攻击

波音公司2013年8月宣布根据耐用电子项目(RELI)计划开发的薄片激光器实现了功率计光束质量的既定目标,达到了武器级水平,其输出功率已经达到了30kW,同时实现了较高的电-光转换效率。上面介绍了几个有代表性的硬杀伤激光武器系统,从目前美军激光武器试验情况来看,基本上以光纤激光器和全固态激光器为核心,对激光器的要求基本上是高可靠性、高电光效率、小型化、模块化,以实现紧凑的激光武器系统。

除美国外,其他国家也在积极加大对高能激光武器的研发。2012年,德国对由莱茵金属公司研制的50kW光纤激光枪并进行了试验,该激光器采用光束非相干合成技术,将多根光纤激光合为一束对目标进行照射,能够在数秒内烧穿迫击炮的外壳和40mm厚的金属板。在同年12月的演示中,该激光武器从1km的距离击穿一个15mm厚的巨大钢梁,在两公里范围内成功击落数个无人靶机,探测并成功打击小型弹道导弹目标。

由法国、德国、波兰和葡萄牙组成了欧洲防空高能激光武器计划联盟(AD-HELW),提出了一个完整的防空高能激光武器系统设计。前期利用工业级高功率光纤激光器进行非相干光束合成,实现100kW功率的高能激光光源,在5年内完成AD-HELW全系统的建设。同时,开展一种全新200kW单口径高能激光源的

研发,之后将系统中的光纤激光器替换成该激光源。

3 激光器在军事领域中的其他应用

除了软、硬杀伤激光武器外,在军事领域中,激光技术还用在激光制导、激光探测、激光对抗(红外干扰、激光诱偏)、激光测距、激光指示、激光传能等。

激光制导是利用激光跟踪、测量和传输等手段,控制和指引导弹接近目标进而实施精确打击的先进技术^[4]。典型的激光制导武器包括空地导弹,如美国的AGM-114、AGM-65C、以色列的Nimrod、南非的MOKOPA,激光制导炸弹如美国的Paveway系列,俄罗斯的КАБ系列,以色列的“格里芬”系列等。

与传统探测方法相比,激光探测具有精度高,抗干扰能力强等特点,在2008年,美国海军花费了2500万美元购买了3套诺·格公司设计的机载激光水雷探测系统,以消除海面船只从水下受袭的隐患,并计划在未來5年内扩大需求再生产25套。

所以,自海湾战争以来,对定向红外干扰系统的需求不断增强。美国军方已在运输机、轰炸机、直升机上装载了可对抗3代以上红外导弹的机载红外对抗系统,对红外导弹的红外导引头进行干扰,使导弹丢失或偏离目标,保护军机免受导弹的攻击。其中,诺·格公司的AN/AQQ-24(V)红外干扰系统用于保护固定翼运输机和小型旋翼飞机,大型飞机红外干扰(LA IRCM)系统的目的是要保护军用运输机和加油机免遭红外制导导弹的攻击,先进威胁红外干扰(AT IRCM)系统计划的目的是保护陆军的低飞、慢速直升机免遭地对空红外导弹的攻击。

激光诱偏是通过发射激光干扰信号,扰乱或欺骗敌方激光测距、观瞄、跟踪或激光制导系统,以保护高价值的地面目标或军事设备,目前已经获得广泛应用。典型的包括美军

的AN/VLQ-6装甲战车保护系统,AN/GLQ-13车载激光诱骗系统、英国GEC-Maconi航空电子设备公司研制的405型激光诱饵系统,法国的KBCM主动防护系统、德国和英国联合研制的GLDOS激光对抗系统等^[15]。

结束语

随着激光技术的不断发展,激光技术在工业加工、航空航天、国防武器装备领域的地位日益提高,需要一方面积极地新型激光器研制和激光应用的探索,另一方面加快激光器件的工程化进程,将科研成果迅速地转化到应用领域,研制出效率高、性能稳定、易于操作维护、平台适应性强的激光器件。

参考文献

- [1] Scherpereel X, Peyre P, Fabbro R, et al. Modifications of mechanical and electrochemical properties of stainless steels surfaces by laser shock processing. *The International Society for Optical Engineering*, 1997(3097): 546-557.
- [2] King A, Steuwer A, Wodward C, et al. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening. *Material Science and Engineering A*, 2006(435-436):12-18.
- [3] 梁春华. 航空发动机风扇/压气机叶片激光冲击强化技术的发展与应用. *航空制造技术*, 2012(23/24): 46-49.
- [4] Momma C, NChichkov B, Nolte S, et al. Short-pulse laser ablation of solid targets. *Opt. Comm.*, 1996, 129 (1-2):134.
- [5] Kamlage G, Bauer T, Ostendorf A, et al. Deep drilling of metals by femtosecond laser pulses. *Appl. Phys. A*, 2003(77): 307-310.
- [6] Richter K H. Laser material processing in the aero engine industry. Established, cutting-edge and emerge applications. *Proceedings of the 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics 2008*: 1005.

本文共有参考文献15篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 日午)