

激光直接制造金属零件技术在航空航天领域的应用

Application of Laser Direct Manufacturing of Metallic Part in Aerospace Industry

北京工业大学激光工程研究院 张冬云 冯青华 李志波 赵志英



张冬云

北京工业大学激光工程研究院副教授。获省部级科技进步奖 3 项，发表论文 30 余篇，专利 10 余项。2000~2004 年在德国 Fraunhofer 激光技术研究所进行 SLM 技术的研究工作，2004 年 8 月获得德国亚琛工业大学机械制造专业工学博士学位。目前进行 LENS 以及激光焊接技术的研究。

激光直接制造金属零件技术自 20 世纪 80 年代诞生以来得到了迅猛的发展，这一发展体现在快速制造领域的各方面，如材料、工艺、设备以

与传统的制造技术相比，激光直接制造金属零件技术不仅可以缩短产品研发时间、降低研发成本、对市场需求进行快速反应，另外其宽泛的设计自由度以及易于与其他制造技术进行集成的特点为制造业提供了单件、小批量、个性化生产零件提供了可能^[1-3]，使之成为 21 世纪最具有潜力的制造技术。

及相关的应用领域。与传统的制造技术相比，激光直接制造金属零件技术不仅可以缩短产品研发时间、降低研发成本、对市场需求进行快速反应，另外其宽泛的设计自由度以及易于与其他制造技术进行集成的特点为制造业单件、小批量、个性化生产零件提供了可能^[1-3]，使之成为 21 世纪最具有潜力的制造技术之一。

采用激光直接制造金属零件技术制造的零件具有较高的刚度、尺寸的精确性、轻量性和水密性，因而该技术已经在航空航天、国防、汽车、医疗、电子等领域得到了应用^[4]，这些应用体现了直接由 CAD 数据向零件快速转化的制造技术的优越性。这一技术已经不止是对铸、锻、焊以及

电火花加工等传统制造技术的补充，其对零件形状以及对加工材料的无限制的制造特点使之更加优于传统技术。

问题与挑战

随着激光直接制造金属零件技术在应用领域的扩展，生产制造企业越来越关注该技术产品的生产效率、产品的重现性以及可控性^[5]。体现在应用研究领域则是内部缺陷和内部组织控制、变形开裂预防、表面质量的改善以及生产效率的提高和制造成本的降低等。这些方面已经成为制约该技术在制造领域进一步扩大应用的“瓶颈”。

在激光直接制造金属零件过程

中,激光与粉末之间发生相互作用,在材料的基体中建立了循环的、峰值较高的、冷却速度较快的温度场,其冷却速度达 $1 \times 10^6 \text{ }^\circ\text{C/s}$,与铸造过程的冷却速度 $1 \times 10^4 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 相比快 2 个数量级,其极快的冷却速度、超高的局域温度场分布以及变化的激光扫描方式对成形件内应力的形成、积累甚至变形开裂具有决定性的作用。因为在成形件内部不仅有由于激光循环加热形成的热应力,也有由于非平衡凝固形成的组织应力,还有移动热源作用下的热收缩应力,这些应力共同作用,存在于成形件内部,并随着成形过程的进行在成形件内部积累,使成形件的变形开裂控制难上加难。

另一方面,极快的冷却速度、超高的局域温度场分布以及变化的激光扫描方式作用下的非平衡快速凝固形核和长大过程直接决定了最终零件的组织形态、尺寸、晶体取向、晶界结构、化学成分均匀性等,也直接决定了成形件的综合机械性能。

由于过程中会发生工艺参数的变化、外部环境的不同、熔池的波动以及扫描方式的变化等,可能会在扫描层之间、扫描面之间以及扫描线之间形成未融合、卷入气体、夹杂而形成内部缺陷,最终影响成形件的质量、力学性能和使用安全^[6-7]。

目前采用激光直接制造金属零件方法制造的成形件表面质量较为粗糙,一般不能直接使用,需要后加工来提高尺寸精度、表面质量。影响成形件尺寸精度和表面质量的因素有很多,可以概括地分为软件因素、硬件因素以及工艺因素等。软件因素有图形处理软件的影响

以及工艺软件的影响。硬件因素包括加工系统中的光源、导光系统、铺(送)粉系统、控制系统等。工艺因素包括扫描方法、光源直径、粉末颗粒度、搭接量等因素,因而激光加工设备的整体性是保证成形件尺寸精度以及表面质量的必要条件,是促进激光直接制造金属零件研究与应用的工程问题^[8]。

在航空航天领域的应用

有 2 种方法可以用于直接制造金属零件,即区域选择激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术和近净成形(Laser Engineered Net Shaping, LENS)技术。

它们的共同点在于被加工材料为工程材料的粉末,成形件的致密度、力学性能达到了工业要求。差别在于 SLM 技术是基于粉末床的金属零件快速制造方法,即激光与粉末材料之间的相互作用发生在粉末床上。而 LENS 技术的基础是激光涂覆技术,是基于局域送粉的金属零件快速制造方法。激光涂覆技术的目的是通过在加工工件的表面熔覆功能层来提高工件的耐磨性和抗腐蚀能力。常用于零件或者模具的修复。为了实现修复,补充缺损的材料,常常进行多层加工,在此基础上形成了激光近净成形技术,在这一技术中,激光与粉末的相互作用发生在

熔池附近。

SLM 技术的优势在于激光的运动由振镜来完成,其反映速度快、定位准确,缺点是振镜的转动范围限制了激光的扫描范围,由此决定了 SLM 技术适合加工尺寸较小、形状复杂、要求精密的零件。而 LENS 技术中激光通过飞行光学导光系统(CO_2 激光器)或者机械手(固体或者半导体激光的运动完成),适合加工尺寸较大、形状简单、对精密性要求不高的零件。

SLM 技术已经成功开发的材料有不锈钢^[9]、工具钢、热工钢、钛及钛合金^[10]、铝合金^[11]、钴铬合金、镍基合金等^[11]工程材料,成功制造了注塑模具、压铸模具、生物植片、航空航天零件以及各种金属零件的功能模型。

图 1 为采用 SLM 技术制造的钛合金中空结构。钛合金为太空材料,自身具有重量轻、比强度高特点,与实体结构相比中空结构的形状复杂、重量轻、刚度高,是典型的“轻型制造”,因而 SLM 技术特别适合制造航空航天技术的零部件^[12]。

图 2 是航空发动机的高压涡轮的喷气阀。其在工作时的主要失效形式为阀的中心部分发生较大的裂纹。

传统的修复方式为移除损坏的阀门中心部分,如图 3 中左上部分,然后采用粉末冶金的方法铸造移除

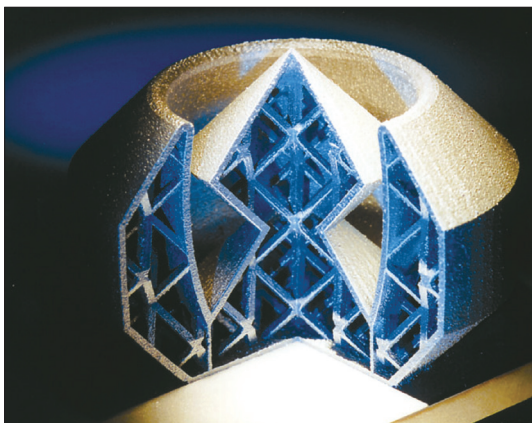


图1 采用SLM技术制造的钛合金中空结构

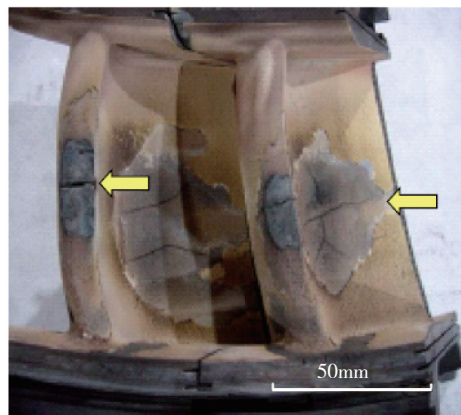


图2 高压涡轮叶片的失效方式

的阀门中心部分,再采用钎焊技术焊接铸造插件和喷气阀的剩余部分。这一修复工艺的缺点是铸造阀门的中间部分需要开模,加工过程所需的时间长,另外经钎焊工艺后,喷气阀的耐久力变差。因而提高修复后的喷气阀的耐久力是全球航空航天领域工程技术人员努力的目标。新型

造过程费时费力,制造成本也较高,一旦缺损其修复的成本也较高。而 LENS 技术可以用于修复传统焊接方法无法修复的零件。图 5 为采用 LENS 技术修复的黑鹰直升机发动机叶轮的叶片。修复位置为叶片的导向边,导向边极易受到磨损以及外来损害(FOD)。修复的部分具有



图5 LENS技术修复的黑鹰直升机叶轮上的叶片

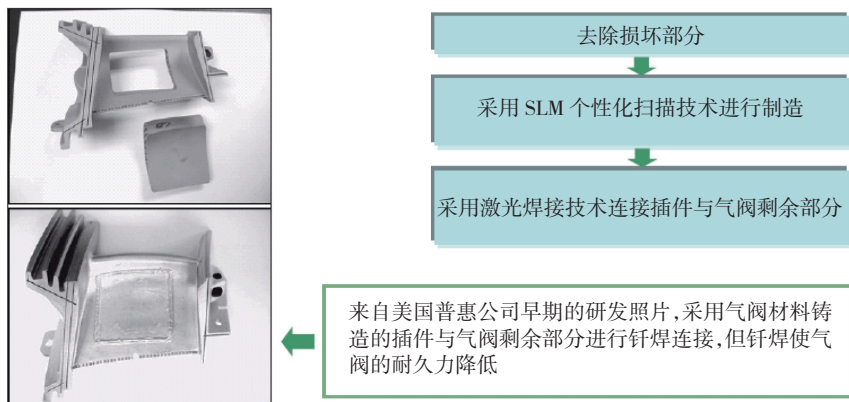


图3 失效高压涡轮叶片的修复方法图解和修复路线

的工艺是通过 SLM 技术制造移除的喷气阀中间部分,在采用激光焊接技术连接 SLM 制造的插件和剩余的喷气阀部分^[13]。

LENS 技术开发使用的材料是金属、合金、陶瓷以及复合材料的粉末^[3]。目前 LENS 技术较多地用于高附加值金属航空航天零件的制造、修复及改型。例如飞机起落架、外挂架翼肋、外挂架舱壁等零件具有用量少、结构复杂等特点,一般使用钛合金、铝合金等高性能轻金属,这些零件采用传统的方法(铸、锻、焊、车)难以加工,或者即使可以加工,但是由于制模等过程零件加工所需的时间较长、复杂零件的加工受到限制以及我国缺乏大吨位水压、油压机等基础设施的因素,限制了这些零件的快速面世^[14-15]。

采用 LENS 技术制造的 C-17 战机上的钛合金外挂架舱壁^[15]见图 4。再如航空发动机涡轮转子、压气机定子等元件一般采用镍基合金或者钛合金制造,这些零件的制

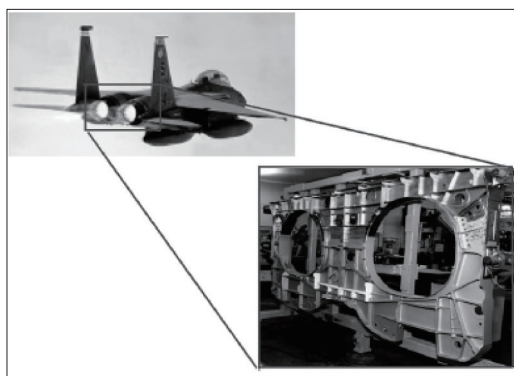


图4 LENS技术制造的C-17战机上的外挂架舱壁

近终型轮廓,性能优于原始材料的性能。经低周疲劳测试:在 5000~50000r/min 的循环应力作用下,承受了 5000 次交变应力无事故而通过测试。

LENS 技术在航空航天另外一个应用是对模具进行改型。现代技术中产品的更新换代较快,模具的设

计、制造以及后续的产品生产过程历时较长,一旦制成的模具不符合实际需求,只需按照需要对制成的模具进行些许改动就可以重新进行生产,因而节省了制造成本以及制造时间^[15]。

LENS 技术在航空航天领域的另一应用就是“移动式零件修复医院”。核心是采用 LENS 技术在战场上进行关键件的修复或者制造。它甚至可以采用卫星通信设备传输有关制

造零件的数据信息。在没有数据信息的情况下,也可以采用逆向工程获得要建零件的外部轮廓信息,经过必要的处理后实现修复或者制造工作。图 6 为加工中心的模块外形,内部为加工间^[16]。

LENS 技术最具特色的优势在于通过改进送粉技术,实现零件中材料成分的实时连续变化,制造材料以



图6 移动式零件修复医院

及性能具有梯度的高性能零部件。

图7为采用LENS技术制造的先进涡轮发动机三合金叶轮。该叶轮的A处主要承受冲击力,要求具有较高的强度,材料为传统的Ti6Al4V合金;B处主要承受摩擦力,工作温度较高,要求具有较高的低周疲劳强度,采用正斜方晶钛合金Ti22-23;C处则需要有较高的蠕变强度,采用 γ -TiAl(Ti48Al2Cr2Nb)合金制造。图8为Ti6Al4V与 γ -TiAl(Ti48Al2Cr2Nb)2种合金的冶金结合界面。可以看到2种材料之间的突然转变,但是接合处组织细小、致密^[16]。开发LENS技术相关设备的美国Optomech公司和德国通快公司分别开发了2种不同粉末的实时混合系统以及四路混合送粉系统,可以实现多种粉末的实时混合^[18]。

我国在LENS技术领域的研究较早,取得的成果斐然。王华明等在国家863计划等的支持下,首先进行了LENS技术设备的研究,在该设备的基础上进行了飞机次/主乘力钛合金结构件、航空钛合金框、梁、壁

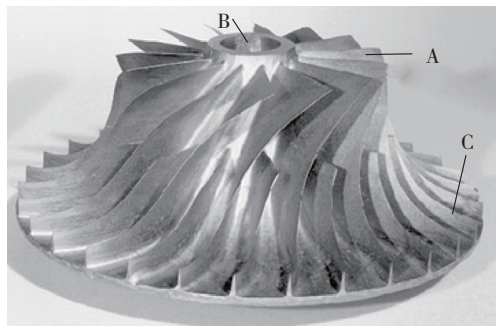


图7 采用LENS制造的先进涡轮发动机的三合金叶轮

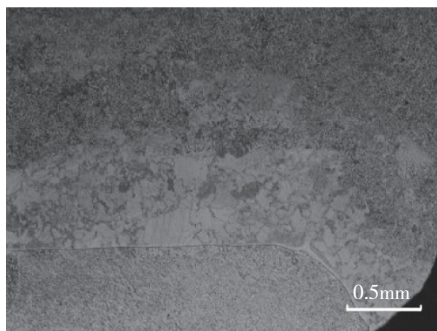


图8 Ti6Al4V与 γ -TiAl(Ti48Al2Cr2Nb)的连接界面

板、梯度结构梁和复杂结构件的应用研究,并进行了定向生长高温钛合金熔铸方法以及发动机压气机叶片熔铸快速成形的应用研究,为我国在该领域的应用研究奠定了雄厚的基础^[14]。

黄卫东等在国家973等国家以及航空领域项目的支持下,对LENS技术的工艺规律、熔凝特性、组织结构以及缺陷形成规律进行了系统研究。研究的材料主要为钛合金、镍基合金以及NiTi等金属间化合物,并进行了发动机涡轮盘和压气机整体叶盘的快速成形应用研究,取得了较好的研究成果^[19-20]。北京有色金属研究院在国家863、973计划的支持下进行了基于LENS原理的激光直接制造金属零件的工艺研究,分别进行了铜合金、不锈钢、镍基合金的成形工艺研究以及镍基合金与CW/CTi等的梯度复合零件的研究^[21-22]。

综上所述,我国在该领域的研究主要集中在高校以及研究机构,取得了一定的技术突破,特别是在直接制造钛合金结构件方面。鉴于该技术当前在航空航天等领域的重要作用,建议投入更大的研究力量进行技术攻关,解决上述的“瓶颈”问题,提高应用领域的应用水平,为该技术的应用奠定更加深厚的基础。

未来发展趋势

快速原型制造技术经历了从原型件制造、功能模型制造、技术模型制造、全功能零件制造的发展过程,目前在航空航天领域的应用得到了巨大的发展。

但是到目前为止世界范围内的应用研究已经充分地显示:应用范围在不断地扩大,目前的研发还没有覆盖所有可能的应用领域;同时

也进一步阐明产品向个性化发展是该技术的特色,快速原型制造技术是一种面向用户的金属零件直接制造技术^[12,23]。

目前影响成形件在工程领域的应用主要有内部缺陷和变形开裂的控制、成形件尺寸精度、表面质量以及后加工方法等因素。不断地开发新材料,为快速原型制造技术缔结更多的应用领域,不断地改进和完善工艺、提高加工系统的整体性是控制内部缺陷、变形和开裂、提高成形件尺寸精度、表面质量、减少后续工序的必由之路。

参考文献

- [1] Zhang D Y. Entwicklung des Selective Laser Melting (SLM) fuer Aluminiumwerkstoffe[D].Dissertation RWTH Aachen, 2004:107-111.
- [2] 张冬云. 采用区域选择激光熔化技术(SLM)直接制造铝合金零件. 中国激光, 2007, 34(增刊):141-145.
- [3] Gebhardt A. Rapid Prototyping: Werkzeuge fuer Die Schnelle Produktentstehung. Carl Hanser Verlag Muenchen Wien, Deutschland, 2000: 455-470.
- [4] Sridhar A, Attanasio D, Nannini A. Trends and expertise exchange within rapid manufacturing in europe. RT e-Journal Forum fuer Rapid Technology, 2010.
- [5] Blattmeier M, Töpker J, Witt G. Technologische reife von generativen herstellungsverfahren für Endanwendungen im automobilbau. RT e-Journal Forum fuer Rapid Technology, 2010.
- [6] 王华明, 张述泉, 王向明. 大型钛合金结构件激光直接制造的进展与挑战. 中国激光, 2009, 36: 3204-3209.
- [7] 张冬云, 王瑞泽, 赵建哲, 等. 激光直接制造金属零件的最新进展. 中国激光, 2010, 37: 18-25.
- [8] 王瑞泽, 张冬云, 鹿堃, 等. 提高快速成型技术中数据处理过程精度的研究综述. 机械设计与制造, 2010(5):215-217.
- [9] Meiners W. Direktes selektives laser sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe[D]. RWTH Aachen, 1998.

本文共有参考文献25篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 泰山)