

文章编号: 0258-7025(2010)01-0018-08

激光直接制造金属零件技术的最新进展

张冬云 王瑞泽 赵建哲 左铁钊

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

摘要 介绍了快速原型制造技术的发展状况以及目前世界上激光直接制造金属零件的两种主要方法,并指出了激光直接制造金属零件的最新进展以及未来发展趋势。

关键词 激光技术;快速原型制造;激光直接制造;模型;金属零件

中图分类号 TH16;TG665 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103701.0018

Latest Advance of Laser Direct Manufacturing of Metallic Parts

Zhang Dongyun Wang Ruize Zhao Jianzhe Zuo Tiechuan

(College of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The paper briefly introduces the development of rapid prototyping technology and two main methods of laser direct manufacturing of metallic parts, further gives the latest advance and the development trend of laser direct manufacturing of metallic parts.

Key words laser technique; rapid prototyping; laser direct manufacturing; model; metallic parts

1 引 言

激光直接制造金属零件技术是指以激光为热源采用快速原型制造技术生产金属功能模型和零件的技术。激光直接制造金属零件具有节省制造成本、缩短产品上市时间以及产品复杂程度不受生产过程限制(即具有生产个性化产品的能力)等特点,为快速、单件或小批量生产金属功能模型和零件提供了可能^[1,2]。

目前激光直接制造金属零件技术已经在工业产品、航空航天、国防、医疗、电子等领域得到了应用。例如采用选区激光熔化(SLM)技术制造的注塑模具、压铸模具、牙冠以及假牙,采用激光近净成形(LENS)技术制造的军用飞机结构件、进行的航空发动机涡轮叶片的修复等,无一不体现了这种直接由计算机辅助设计(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。

2 快速原型制造技术与激光直接制造金属零件技术

2.1 快速原型制造的发展状况

自 20 世纪 80 年代以来快速成形(RP)技术在 20 多年的时间里得到了飞速的发展,目前已经有 20 多种快速成形工艺,但是根据所用的设备、所加工的材料、所生产模型等特点基本可以把这些快速成形工艺归结为 5 种基本方法,即激光立体固化(SLA)、实体叠层制造(LOM)、区域选择激光烧结(SLS)、熔融沉积制造(FDM)以及三维印制^[3]。1987 年第一台商业化的快速原型设备即激光立体固化设备 SLA 250 上市,标志着快速原型制造时代的来临,此后其他成形方法的设备也逐渐走上市场。根据文献[4]2006 年全年全世界范围内生产的快速原型设备达到了 21960 台,其中销售量为 4165 台。2006 年全年采用快速原型技术制造的模型中有 12% 用于终端产品,其余部分则用于产品规划与设计阶段的原型制造以及产品准备阶段的快速模具制造(RT)中。

收稿日期:2009-04-15;收到修改稿日期:2009-06-17

基金项目:国家 973 计划(2006CB605206)资助项目。

作者简介:张冬云(1969—),女,副研究员,主要从事快速成形和激光焊接技术等方面的研究。

E-mail: zhangdy@bjut.edu.cn

所生产的模型大致分为进行尺寸、外形、配合检验的几何模型、进行多种功能检测的功能模型和进行系列产品性能检验的技术模型。目前激光直接制造金属模型技术的发展情况已经清楚地表明,从技术模型向快速产品制造(RM)的转化非常成功。

诚然 RM 还是一项崭新的技术,对 2007 年采用 RM 技术生产的终端产品进行调研时发现:采用 RM 技术生产终端产品的主要特点有 4 个:1) 与传统产品技术相比采用 RM 技术制造的产品能够以更快的速度走向市场;2) 无需制造模具可以降低产品的制造成本;3) 传统的制造技术在生产形状复杂零件时遇到瓶颈,限制了应用;4) 产品在更新换代时无需重新进行模具的设计开发,为产品制造节省了时间以及成本。上述特点可以看出 RM 技术已经不止是对传统制造技术的替代和补充,其对生产零件形状以及对加工材料的无限制使之更加优于传统技术^[5]。

2.2 快速原型制造技术与激光直接制造金属零件

在 20 多年的时间里上述 5 种快速成形方法无论在工艺研究、材料扩展以及应用研究上都取得了丰硕的成果。例如美国波音公司采用 SLS 技术制造填充玻璃的聚酰胺尼龙气体管道代替金属零件应用于波音飞机(Kind Boeing)的生产中。传统的 F/A-18 管道由 22 件零件组成,采用上述技术后减少为一件,同时减少了后续工序。在年产量很少的情况下,节省制造时间的同时也节省了巨大费用。众所周知,2003 年美国成功地对出生于埃及的头部连体婴儿实施了分离手术。手术前 48 位参加手术的医生在头盖骨模型上进行了训练^[6],这一头盖骨模型是美国 ZCorp. 公司采用 SLS 技术生产的。另外德国宝马公司采用 FDM 技术为宝马生产线制造了手持装配工具,由于快速成形技术可以用于制造自由形状的零件,对零件的复杂程度无限制,在制造小批量的装配工具时显示了充分的优越性^[7]。但是在众多的工程应用中人们更加青睐的是金属零件的直接制造,采用快速成形技术直接制造金属零件自该技术诞生以来就成为其中最为关键的技术之一。

采用激光直接制造金属零件的方法主要有两种,即 SLM 和 LENS 技术。它们的共同特点首先在于所加工的材料均为单组元粉末材料,也就是工程材料的金属粉末;其次在加工过程中金属粉末完全熔化,熔化的粉末快速凝固之后成为致密度为 100% 的金属模型或者零件。区别在于 SLM 技术是基于粉末床的金属零件快速制造方法,而 LENS

技术是在激光涂覆技术基础上发展起来的基于局域送粉的金属零件快速制造方法。由于制造工艺的不同,决定了制造零件的尺寸、表面质量、能够制造零件的复杂程度以及应用领域的不同^[8]。

3 激光直接制造金属零件

3.1 SLM 技术

SLM 技术是区域选择 SLS 技术的变种,其工作过程与 SLS 相似:首先建立要建零件的 CAD 模型,然后通过特殊的分层软件对 CAD 模型进行切片处理,并把生成的层信息传递给控制计算机。激光束按照所得信息对位于工作台上的金属粉末进行选区扫描,被扫描的粉末发生完全熔化,随后结晶为固体。一层加工完成之后,工作台下降一定的距离,送粉器再铺上一层粉末,然后激光对下一层进行扫描,激光扫描-工作台下降-铺粉这一过程不断重复,直到完整的模型生成,过程如图 1 所示。

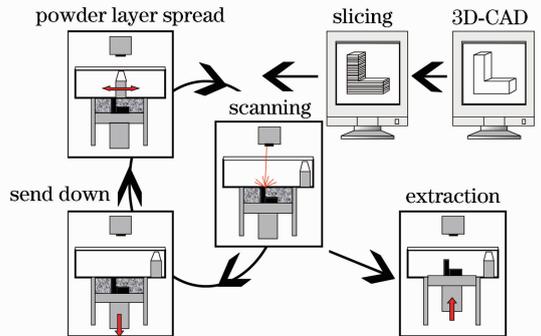


图 1 SLM 技术过程图

Fig. 1 SLM technology process

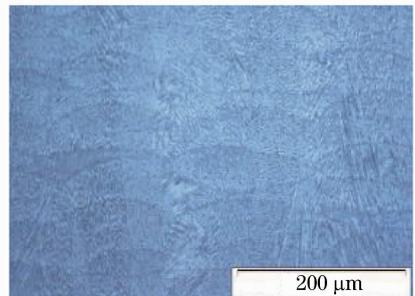


图 2 采用 SLM 技术生产模型的金相组织(Inconel 718)

Fig. 2 Microstructure of model manufactured by SLM technology (Inconel 718)

SLM 技术可以加工的材料为不锈钢^[9]、工具钢、热工钢、钛及钛合金^[10]、铝合金^[1,2,11]、钴铬合金、镍基合金等工程材料。采用 SLM 技术生产模型的致密度(Inconel 718)如图 2 所示。由于所用的材料与系列产品生产过程所用的材料相同,生产的

零件性能也能满足工程上对零件使用性能的要求而直接用于生产。SLM 设备的导光系统使用振镜,特点是反映速度快、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 技术能够以及适合加工尺寸较小、形状复杂、要求精密的零件。主要用于注塑模具、压铸模具、生物植片、航空零件以及各种金属零件功能模型的制造。

SLM 技术的关键在于激光扫描技术、激光扫描过程中温度场的控制以及新材料的开发等。激光扫描工艺不仅可以影响成形件的表面质量,也可以影响成形件内的应力分布、成形件的尺寸精度,甚至决定成形件的成功与否。温度场的控制则影响着成形件的综合机械性能以及内应力分布。控制温度场不仅可以从激光参数的选择下手,也需要从材料的加工特性考虑采用外加温度场的办法。激光与材料的加工发生在粉末床上,在加工过程中熔化的金属粉末在粉末床中建立了循环的、峰值较高的、冷却速度较快的温度场,其冷却速度达 1×10^6 °C/s,与铸造过程的冷却速度 1×10^4 °C/s 相比快 2 个数量级,其中冷却速度以及局域温度场分布对微观组织的形成具有决定性的作用,进而影响成形件的综合机械性能。不同加工特性的材料在加工过程中对裂纹、气孔以及孔洞等加工缺陷的敏感性不同,应该根据不同材料的加工特性,确定合适的外加温度场,影响和控制缺陷的形成。这些基础研究是在技术过程中始终需要解决的理论与实际问题,而且针对不同的材料、不同的加工特性选择不同的激光参数以及不同的外加温度场方法。文献[1,9,10]在上述领域进行了大量的研究工作,克服了上述难题,在采用 SLM 技术制造金属零件以及这些零件在工业上的应用奠定了基础。

目前影响成形件在工程领域应用的因素主要有

法^[5]。如果成形件尺寸精度高、表面质量好,所需的后加工工序简单、数量少,那么成形件较容易被应用领域接受。反之则为该技术在工程中的应用设置了瓶颈。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和硬件因素。软件的影响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、铺粉系统、控制系统等。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^[12],是促进激光直接制造金属零件研究与应用的工程问题。

SLM 技术研发以及应用主要在欧洲。德国弗朗恩霍夫激光技术研究所首先在 SLM 技术领域进行了研究。Innoshape 公司就是在该所多年的基础以及应用研究工作上发展起来的,所用的设备为与通快公司共同研发的 TrumaForm130 和 TrumaForm250。设备中具有两个建模工作室,保证激光器具有较大的工作效率。所用光源为 Nd:YAG 激光,最高输出功率为 250 W,激光束通过光纤传导。该公司采用 SLM 技术进行了生产功能模型、注塑模具、压铸模具、生物植片、形状复杂的中空、薄壁件等的应用研究。图 3(a)为采用 SLM 技术生产的气动实验用涡轮叶片功能模型,其内流道可以用于气流的测量,材料为具有优良铸造性能以及焊接性能的 AlSi10Mg。采用 AlSi10Mg 材料制造零件的抗拉强度为 $R_m = 280$ N/mm²,屈服强度为 $R_{p0.2} = 280$ N/mm²,断裂极限为 $A = 1\% \sim 2\%$,弹性模量 $E = 61600$ N/mm²,表面粗糙度 $R_z = 23 \sim 35$ μm。其性能高于或者相当于铸造铝合金零件时效后的性能。图 3(b)为采用纯钛制造的人体心脏功能模型,其 CAD 数据来源于 CT 扫描^[13]。

Concep Laser 是德国最早生产 SLM 设备的公司之一,其技术也是来源于弗朗恩霍夫激光技术研

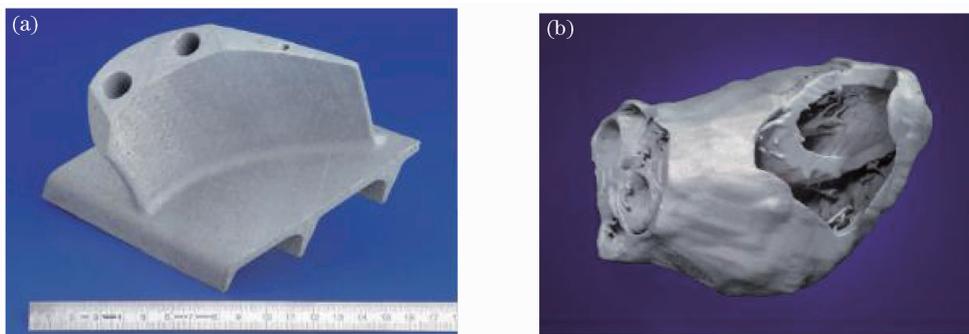


图 3 (a) 采用 SLM 技术生产的涡轮叶片功能模型;(b) 激光生长技术生产的人体心脏

Fig. 3 (a) Functional model of turbo vane manufactured by SLM; (b) body heart manufactured by SLM

究所的 SLM 工艺。它不同于通快公司设备的特点在于采用线性直接驱动以及反射镜实现光束的转折,极大地扩大了激光扫描范围。另外该设备把 SLM,3D 雕刻以及激光直写技术集成到同一设备中,扩大了设备的应用范围以及销售量。图 4 为采用 SLM 技术生产的注塑模具,材料为热工钢,图 4(a)下图为实际制造的注塑模具,上图为该模具的 CAD 图,图中标注了该模具内部具有冷却功能的内流道。该内流道的制造成功大大延长了模具的使用寿命,提高了注塑成品件的表面质量^[14]。

英国 MCP 公司的 SLM 技术是在与德国 Fockele & Schwarze 公司合作的基础上进行的。Fockele & Schwarze 公司在其设备开发的早年与弗朗恩霍夫

激光技术研究所进行了方方面面的合作。其设备 SLM Relizer100 是在 Fockele & Schwarze 原有设备基础上改善进行的。图 4(b)为采用 Inconel718 制造的 5 孔探针,用以测量涡轮发动机的工作效率,不同物理量的测量分别在入口以及出口进行,把 SLM 技术生产的探针装入探针盒[图 4(c)]可以同时进行多个测量,既提高了测量的精确度,也减少了测量时间^[14]。另外德国宝马公司的成形中心采用了 MCP 以及 Concep Laser 公司的 SLM 设备,该中心与公司的专业部门紧密联系,把 SLM 技术作为直接制造金属模型以及零件的主要方法,旨在解决新车型研发前期需要解决的问题,如优化加成技术的过程链、对新材料的使用进行检验等^[15,16]。

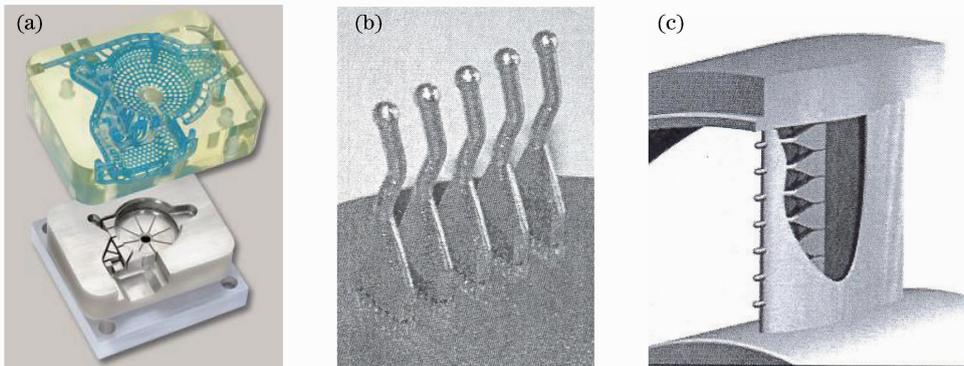


图 4 (a) 采用 SLM 技术生产的注塑模具;(b) 采用 SLM 技术生产的 5 孔探针;
(c) 采用 5 孔探针盒测量压力以及气流方向

Fig. 4 (a) Injection mould manufactured by SLM; (b) five-hole-probe manufactured by SLM;
(c) measure of pressure and gas flow direction with five-hole-probe box manufactured by SLM

国内目前进行 SLM 技术研究的主要有华南理工大学。吴伟辉等^[17]与公司合作开发了 SLM 设备,在该设备的基础上进行了牙颌和托槽组合体以及一些复杂形状的成形工艺研究工作。华中理工大学与北京大学第三医院进行了义齿与牙冠的成形工艺以及设备的研究。北京工业大学激光工程研究院在该领域也具有较深厚的基础,但是总体来说国内在该领域的研究还处于方兴未艾阶段。

3.2 LENS 技术

LENS 技术是基于送粉的金属零件快速制造方法,是在激光熔覆技术的基础上发展起来的。激光熔覆的目的是通过在被加工工件的表面熔覆功能层,以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,有时为了实现修复,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^[3,18]。

LENS 技术的制造原理是在计算机上生成零件的 CAD 模型,然后使 CAD 模型离散为一系列二维

平面图形,计算机由此获得扫描轨迹指令。激光束通过光学系统被导入加工位置,与金属基体发生交互作用形成熔池,金属粉末通过送粉器经送粉喷嘴在保护气体的作用下汇集并输送到激光形成的微小熔池中,熔池中粉末熔化、凝固后形成一个直径较小的金属点。根据 CAD 给出的路线,数控系统控制激光束来回扫描,便可通过点、线、面的搭接以及逐层熔覆堆积出任意形状的金属实体零件,如图 5(a)所示。该设备是由激光器与数控系统(或者激光束运动,或者工作台运动)组成的,与 SLM 的加工系统相比该系统更加适合制造形状简单、复杂度低、尺寸较大的零件。LENS 技术使用的材料是金属、合金、陶瓷以及复合材料的粉末^[3,18]。

LENS 技术中的关键问题是粉末输送以及温度、过程控制技术。衡量粉末输送成败的指标是粉末利用率。目前粉末输送大多为同轴送粉技术,粉末利用率一般介于 60%~90%之间。粉末利用率高,成形件的致密度高、内部缺陷少、尺寸精度高、表

面质量好。因而粉末输送是 LENS 技术首先需要解决的问题,特别是需要满足不同的加工工况。温度控制不仅取决于激光加工过程中通过参数调节温度场,还需要外加温度控制系统。通过温度控制与冶金条件的结合,可以调节成形件的微观结构、组织以及性能,甚至可以制造定向生长以及单晶结构件,为快速成形技术增添技术内容,扩大 LENS 技术的应用范围。另外通过温度控制还可以控制成形件内部的应力分布,减小成形件因为应力而发生的变形

或者开裂现象,进而保证成形件的尺寸精度。LENS 技术适合制造尺寸较大的零件,在制造这些零件时由于制造时间较长,应力的控制尤为重要。过程控制是 LENS 技术绝对不能忽略的一个环节。LENS 技术是一种加成技术,要加工零件在体积累积增加的过程中,其误差也层层累积,设备中适合的过程监测以及调节系统是对设备以及工程技术的巨大挑战。

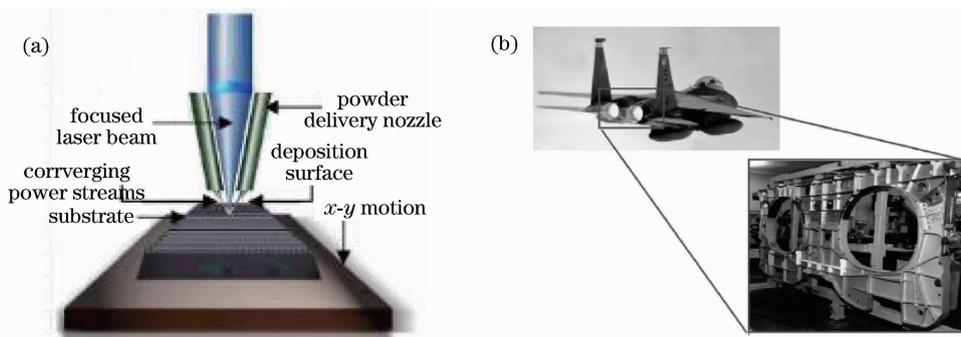


图 5 (a) LENS 技术过程图;(b) LENS 技术制造的 C-17 战机上的外挂架舱壁

Fig. 5 (a) A schematic diagram of LENS process;

(b) exterior hanging cabin wall of combat plane C-17 manufactured by LENS

采用 LENS 技术建成的成形件表面质量较为粗糙,一般不能直接使用,需要后加工来提高表面质量。影响 LENS 成形件的质量因素有:系统光源、导光系统、送粉系统以及控制系统等。如果系统的整体性较好,参数合理,LENS 技术制成的模型或者零件的微观组织中无夹杂、无气孔、无凹陷、无裂纹,致密度达 100%^[11]。对采用 LENS 技术制成的试样进行疲劳测试,结果显示:其制成成形件的疲劳强度高于相应铸件以及锻件的疲劳强度^[19]。

LENS 技术领域的显著成果主要集中在美国。目前 LENS 技术较多地用于高价值金属航空航天零件的制造(即全功能零件的快速制造)、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^[19,20]。图 5(b)为采用 LENS 技术制造的 C-17 战机上的钛合金外挂架舱壁^[18]。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,这些零件的制造过程费时费力,制造成

本较高,一旦缺损修复的成本也较高。而 LENS 技术可以用于修复传统焊接方法无法修复的零件。如图 6(a)为采用 LENS 技术修复的黑鹰直升机发动机叶片的叶轮。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 5000~50000 r/pm 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^[21]。

LENS 技术在国防上的应用主要就是“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要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(b)为加工中心的模块外形,内部为加工间^[22]。此外 LENS 技术还可以用于复合加工即在传统方法加工的底板上制造形状复杂的零

件以及修复工业用燃气发动机零件。图 7(a)为采用复合技术制造的电子产品外壳,图 7(b)为冠部发生磨损的工业用燃气发动机叶片,图 7(c)为修复的燃气发动机叶片的宏观组织。可以看出修复部分的组织基本为定向结晶的组织,与原有的锻造细晶组织有很大的不同。

阀、阀杆、鱼雷气缸座、鱼雷燃油箱、调整和排水叶轮以及连舵杆零件的修复。图 7(d)为采用 LENS 技术修复的潜水艇阀杆。箭头所示为该阀杆在服役中的磨损处。由于阀杆的直径较小,采用传统的氩弧焊技术进行修复时,阀杆的变形较大。LENS 技术的低热输入解决了上述问题^[21]。

LENS 技术还可以用于海军用舰船零部件如球

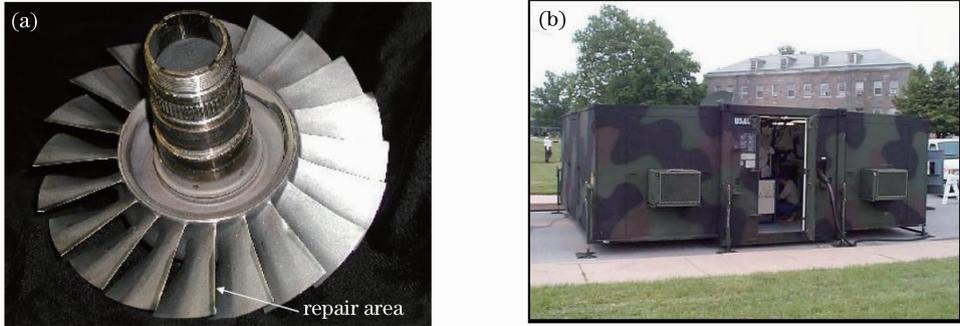


图 6 (a) LENS 技术修复的黑鹰战机叶轮上的叶片;(b)“移动零件修复医院”

Fig. 6 (a) Repaired leading edge of airfoil of black hawk by LENS; (b) mobile repair and manufacturing unit with LENS

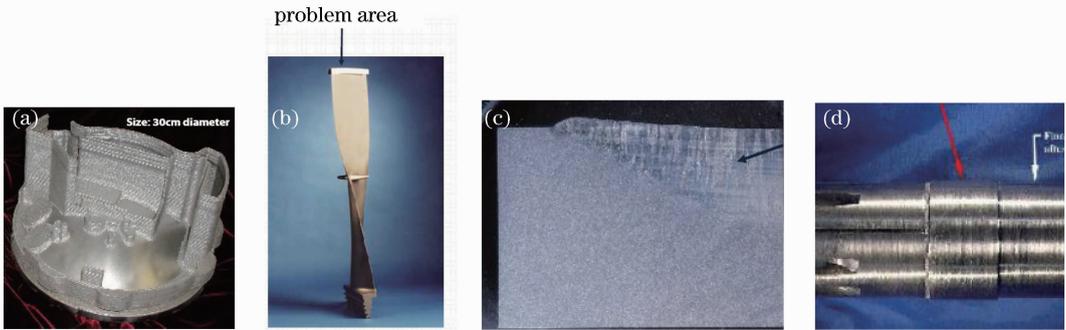


图 7 LENS 技术制造和修复的零件。(a) 电子产品外壳;(b) 磨损的工业燃气轮机叶片;
(c) 修复的工业燃气轮机叶片一角;(d) 潜水艇中磨损的轴颈

Fig. 7 Parts repaired and manufactured by LENS. (a) housing of electronics products; (b) worn vane of industrial gas turbine; (c) repaired problem area of worn vane of industrial gas turbine; (d) worn valve stem of submarine

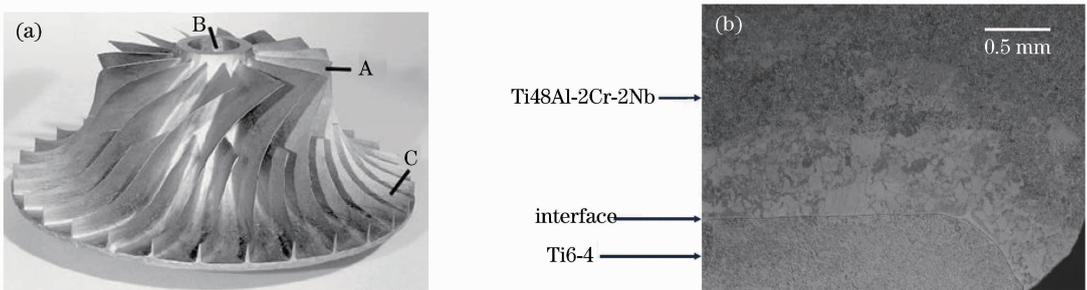


图 8 (a) 采用 LENS 制造的先进涡轮发动机的三合金叶轮;(b) Ti6Al4V 与 γ -TiAl(Ti48Al-2Cr-2Nb)的连接界面

Fig. 8 (a) Tri-alloy impeller of advanced turboshaft engine manufactured by LENS;
(b) interface of Ti6Al4V and γ -TiAl (Ti48Al-2Cr-2Nb)

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,制造具有材料以及性能梯度的高性能零部件。图 8(a)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(Ti48Al-2Cr-2Nb)合金制造。图 8(b)为 Ti6Al4V 与 γ -TiAl(Ti48Al-2Cr-2Nb)两种合金的冶金结合界面。可以看到两种材料之间的突然转变,但是接合处组织细小、致密^[21]。

开发 LENS 技术相关设备的主要有美国 Optomech 公司和德国通快公司。Optomech 公司的 LENS 850-R 采用光纤激光器为热源。五轴数控系统,系统的加工范围为 900 mm × 1500 mm × 900 mm,具有两个旋转轴。系统采用照相机对熔池面积以及 z 轴高度进行监测实施系统的闭环控制。系统具有两路送粉器,可以同时或者独立送粉。同时送粉时可以实现两种不同粉末的实时混合^[23]。通快公司的 DMD505 设备采用 CO₂ 激光为主要光源。五轴数控系统,系统的加工范围为 2000 mm × 1000 mm × 750 mm,具有两个旋转轴。通过两个 CCD 照相机形成系统的闭环控制系统,对熔覆层高度以及焊接过程进行监测。系统具有 4 路送粉装置,可以实现多种粉末的实时混合^[24]。

我国在 LENS 技术领域的研究较早,取得的成果斐然。王华明等^[19]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乘力钛合金结构件、航空钛合金框、梁、壁板、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。黄卫东等^[25,26]在国家 973 计划以及航空领域项目的支持下,进行了 LENS 技术的工艺规律、熔凝特性、组织结构以及缺陷形成规律等系统的研究。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。北京有色金属研究院^[27,28]在国家 863 计划和 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。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,虽然取得了一定的技术突破,但是与美国相比,无论是在设备开发、应用研究方面都存在着较大的差距,也罕有应用成功的实例。鉴于该技术当前在国防、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,提高应用领域的研究水平,为该技术的应用奠定更加深厚的基础。

4 激光直接制造金属零件的未来发展趋势

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,目前在机械制造(包括注塑模具、压铸模具以及汽车制造领域等的应用)、航空、国防、医疗、电子等领域得到了应用。但是到目前为止世界范围内的应用研究已经充分地显示,可能的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快速原型制造技术独一无二的优势,这一优势决定了该技术是一种面向用户的金属零件直接制造技术^[16,29]。

目前影响成形件在工程领域应用的主要有成形件尺寸精度、表面质量以及后加工方法 3 个因素。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 D. Y. Zhang. Entwicklung des Selective Laser Melting (SLM) fuer Aluminiumwerkstoffe [D]. Dissertation RWTH Aachen, 2004. 107~111
- 2 Zhang Dongyun. Research on manufacturing of parts from aluminum alloy using selective laser melting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(Suppl.):141~145
张冬云. 采用区域选择激光熔化技术直接制造铝合金零件[J]. *中国激光*, 2007, **34**(增刊):141~145
- 3 A. Gebhardt. Rapid Prototyping: Werkzeuge fuer die schnelle Produktentstehung [M]. Carl Hanser Verlag Muenchen Wien, Deutschland, 2000. 455~470
- 4 T. Wohlers. Weltweite Brancheneubersicht 2007 Rapid Prototyping und Rapid Tooling. www.wohlersassociates.com
- 5 M. Schilling. Rapid Manufacturing in der Kleinserienproduktion [J/OL]. *RTEjournal*, 2008, (5):0009-2-15364. http://www.rtejournal.de/ausgabe5/index_html/1536/
- 6 P. J. Watermann. Rapid Parts move into the Mainstream [J/OL]. *Desktop Engineering Magazine*, <http://www.deskeng.com/articles/aaaamy.htm>
- 7 G. Schmid. FDM is taking on Increasing Importance as an Alternative Manufacturing Method for Components made in small Numbers. www.fortus.com/uploadfiles/north_america/media/case_study/casestudy-BMW.pdf
- 8 Zhang Dongyun. Review of laser direct manufacturing of metallic parts [J]. *Mechanical Engineering of China*, 2006, **17**:434~437
张冬云. 激光直接制造金属零件发展综述[J]. *中国机械工程*, 2006, **17**:434~437

- 9 W. Meiners. Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe [D]. Dissertation RWTH Aachen, 1998. 100~112
- 10 C. Over. Generative Fertigung von Bauteilen aus Werkzeugstahl X38CrMoV5-1 und Titan TiAl6V4 mit "Selective Laser Melting"[D]. Dissertation RWTH Aachen, 2003. 117~121
- 11 Zhang Dongyun. Model manufacturing progress from aluminum alloy using selective laser melting [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12):1700~1704
张冬云. 采用区域选择激光熔化法制造铝合金模型[J]. *中国激光*, 2007, **34**(12):1700~1704
- 12 Wang Zhiyao. China Materials Engineering Canon [M]. Beijing: Publishing House of Chemist Industry, 2006
王至尧. 中国材料工程大典[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
<http://www.inno-shape.de/ger/downloads.html>
- 13 A. Wiesner. Selective Laser Melting (SLM)-Verfahren, Werkstoffe und Anwendungen, 2nd Hannover Messe Herbstforum, 2008, (9):47~51
- 14 S. Nicolai. Kundenorientierte Optimierung generativer herstellungsprozesse [J/OL]. *RTejournal*, 2008, (5):0009-2-15342. <http://www.rtejournal.de/ausgabe5/1534/>
- 15 www.concept-laser.de
- 16 Wu Weihui, Yang Yongqiang. Key technology of model manufactured using selective laser melting system [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, **43**(8):175~180
吴伟辉, 杨永强. 选区激光熔化快速成形系统的关键技术[J]. *机械工程学报*, 2007, **43**(8):175~180
- 17 Zuo Tiechuan. Advanced Manufacturing Technology of 21 Century — Laser Science and Technology [M]. Beijing: Science Press, 2007. 337~339
左铁钊. 21 世纪的先进制造技术——激光技术与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 337~339
- 18 Wang Huaming. Research advance of aerospace high properties metallic structure parts using RP technology [J]. *Manufacturing of Aerospace*, 2005, (12):26~28
王华明. 航空高性能金属结构件激光快速成形研究进展[J]. *航空制造技术*, 2005, (12):26~28
- 19 Zhang Kai, Liu Weijun, Shang Xiaofeng *et al.*. Application in defense science and technology of RP technology [J]. *Tooling Technology*, 2005, **39**(11):3~12
张凯, 刘伟军, 尚晓峰 等. 快速原型技术在国防科技中的应用[J]. *工具技术*, 2005, **39**(11):3~12
- 20 B. Stuck, R. Grylls. How Laser Engineered Net Shaping (LENS) Technology is used today to accelerate development of new alloys and devices, <http://www.optomec.com/site/webinars>
- 21 M. Hedge. Laser Engineered Net Shaping Technology and Applications, Oral Presentation, www.optomech.com
- 22 N,N, Specification of LENS 850-R, 2007. 1~32
<http://www.de.trumpf.com/produkte/lasertechnik/loesungen/anwendungsfelder/oberflaechen-bearbeiten/pulverauftrag.html>
- 23 Huang Weidong. Freeform Fabrication with Laser-Rapid and Freeform Fabrication of Metallic Parts with High Properties and Density [M]. Xi'an: Publishing House of Northwest University of Technology, 2007
黄卫东. 激光立体成形-高性能致密金属零件的快速自由成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007
- 24 X. J. Xu, X. Lin, J. Chen *et al.*. Microstructural evaluation of a graded nickel-titanium alloy in laser solid forming [C]. *Proceedings of the 3rd Pacific International Conference on Application of Lasers and Optics*, 2008, (4):507~511
- 25 Y. Z Zhang, M. Z. Xi, S. Y. Gao *et al.*. Characterization of laser direct deposited metallic parts [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, **142**:582~585
- 26 Wei Zengmin, Zhang Yongzhong, Gao Shiyu *et al.*. The development of laser metal deposition and its application in fabrication functional gradient material [J]. *Material Review*, 2005, (5):77~80
魏增敏, 张永忠, 高士友 等. 激光快速成形技术的发展及其在功能梯度材料制备上的应用[J]. *材料导报*, 2005, (5):77~80
- 27 R. Mayer. Wettbewerbsfaktor Lasergenerieren [J]. *RTejournal*, 2008, (5): 0009-2-15213. http://www.rtejournal.de/ausgabe5/index_html/1521/