

# 高性能金属零件激光增材制造 技术研究进展\*

张安峰,李涤尘,梁少端,王 潭,严深平,张连重

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710054)

[摘要] 激光增材制造(Laser Additive Manufacturing, LAM)技术实际上是一种兼顾精确成形和高性能成性一体化需求的先进制造技术。首先介绍了两种典型激光增材制造技术的成形原理及其特点;然后介绍国内外激光增材制造技术的最新研究进展;再重点介绍西安交通大学在激光增材制造技术方面的最新研究进展:(1)超声振动辅助激光熔覆沉积对IN718沉积态组织与性能的影响;(2)感应辅助激光熔覆沉积DD4定向晶修复DZ125L叶片的研究;(3)CuW功能梯度复合材料的激光熔覆沉积工艺研究;(4)送粉气纯度对激光熔覆Fe314修复40Cr组织与性能的影响;最后阐述了激光增材制造技术所面临的挑战。

关键词:激光增材制造;激光熔覆沉积;选区激光熔化

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.22.016



张安峰

教授,博士生导师,主要从事激光增材制造(3D打印)技术及其装备,高性能金属零件增材制造技术及其再制造修复工程等方面的研究。

\*基金项目:国家重点专项“高性能金属结构件激光增材制造控制性研究”(2016YFB1100102);国家自然科学基金项目(51275392);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTTSGY03-06)。

增材制造(Additive Manufacturing, AM)是依据三维模型数据将材料连接制作成物体的过程,相对于减法制造,它通常是逐层累加的过程<sup>[1]</sup>,是通过添加材料直接从三维数学模型获得三维物理模型的所有制造技术的总称,集机械工程、CAD、逆向工程技术、分层制造技术、数控技术、材料科学、电子束、激光等技术于一身,可以自动、直接、快速、精确地将设计思想转变为具有一定功能的原型或直接制造零件,从而为零件原型制作、新设计思想的校验等方面提供了一种高效低成本的实现手段。学术界称之为“增材制造”,大众和传媒界称之为“3D打印”。

20世纪80年代末,增材制造技术逐步发展,而且是在全世界多个研究机构相对独立地发展起来,因此被不同机构赋予了不同名称:英国利物浦大学和美国密西根大学 Direct Metal Deposition (DMD)<sup>[2-3]</sup>;加拿大国家研究委员会集成制造技术研究

所 Laser Consolidation (LC)<sup>[4]</sup>;瑞士洛桑理工学院 Laser Metal Forming (LMF)<sup>[5]</sup>;美国 Sandia 国家实验室 Laser Engineered Net Shaping (LENS)<sup>[6]</sup>;美国 Los-Alamos 国家实验室 Directed Light Fabrication (DLF)<sup>[7]</sup>;美国 Aeromet 公司 Laser Forming (LF)或者 Laser Additive Manufacturing (LAM)<sup>[8]</sup>;美国宾州大学 Laser Free-Form Fabrication (LFFF);英国伯明翰大学 Direct Laser Fabrication (DLF)<sup>[9]</sup>。名称虽然不同,但基本的技术原理却是完全相同的,即都是基于同步送粉(送丝)的数字化增材制造技术。

AM技术主要具有以下几个突出的特点:(1)直接。从原材料的粉材、丝材直接成形出来,形状可以是任意复杂的三维零件,直接跨越了传统的铸造、锻造、焊接等工艺,还跨越了粗加工的过程,直接到精加工,这是AM技术最主要的特点;(2)快速。物流环节少,制造工序少,制造周期

加快;(3)绿色。跟“直接”密切相关,中间的过程少了,基础零件不再被反复地加热、冷却,所以能耗就低了;(4)柔性。AM技术可以充分发挥设计师的想象力,设计师的自由度大,可以设计出任意结构的零件;(5)数字化、智能化为制造业的变革带来了可能,因为AM技术发展使传统的流水线、大工厂生产模式有网络化的可能性。故把这种新技术说成是具有直接、快速、绿色、柔性、数字化、智能化特点的AM技术。

## 两种典型 LAM 技术的成形原理及其特点

LAM技术按其成形原理可分为两类:(1)以同步送粉为技术特征的激光熔覆沉积(Laser Cladding Deposition, LCD)技术;(2)以粉床铺粉为技术特征的选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术。下面着重概述这两种典型LAM技术的成形原理及其特点。

### 1 LCD技术成形原理及特点

LCD技术是快速成形技术的“叠层累加”原理和激光熔覆技术的有机结合,以金属粉末为成形原材料,以高能束的激光作为热源,根据成形零件CAD模型分层切片信息的加工路径,将同步送给的金属粉末进行逐层熔化、快速凝固、逐层沉积,从而实现整个金属零件的直接制造。LCD系统主要包括:激光器、冷水机、CNC数控工作台、同轴送粉喷嘴、送粉器及其他辅助装置。

LCD技术集成了快速成形技术和激光熔覆技术的特点,具有以下优点<sup>[10]</sup>:(1)无需模具,可生产用传统方法难以生产甚至不能生产的复杂形状的零件;(2)宏观结构与微观组织同步制造,力学性能达到锻件水平;(3)成形尺寸不受限制,可实现大尺寸零件的制造;(4)既可定制化制造生物假体,又可制造功能梯度零件;(5)可对失效和受损零件实现快

速修复,并可实现定向组织的修复与制造。主要缺点:(1)制造成本高;(2)制造效率低;(3)制造精度较差,悬臂结构需要添加相应的支撑结构。

### 2 SLM技术成形原理和特点

SLM技术是以快速原型制造技术为基本原理发展起来的先进激光增材制造技术。通过专用软件对零件三维数模进行切片分层,获得各截面的轮廓数据后,利用高能激光束根据轮廓数据逐层选择性地熔化金属粉末,通过逐层铺粉,逐层熔化凝固堆积的方式,实现三维实体金属零件制造。选区激光熔化系统主要由激光器及辅助设备、气体净化系统、铺粉系统、控制系统4部分组成。

SLM技术具有以下优点:(1)成形原料一般为金属粉末,主要包括不锈钢、镍基高温合金、钛合金、钴-铬合金、高强铝合金以及难熔金属等;(2)成形零件精度高,表面稍经打磨、喷砂等简单后处理即可达到使用精度要求;(3)适用于打印小件;(4)成形零件的力学性能良好,一般力学性能优于铸件,不如锻件。主要缺点:(1)层厚和光斑直径很小,导致成形效率很低;(2)零件大小会受到铺粉工作箱大小的限制,不适合制造大型的整体零件;(3)无法制造梯度功能材料,也无法成形定向晶组织,不适合对失效零件的修复。

## 国内外激光增材制造技术的最新研究进展

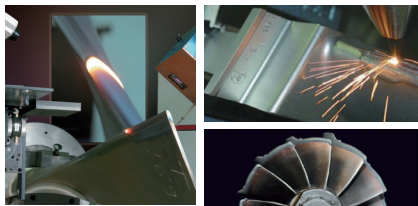
### 1 国内外LCD技术最新研究进展

国内外对于LCD技术的工艺研究主要集中在如何改善组织和提高性能。美国OPTOMECH公司和Los Alamos实验室、欧洲宇航防务集团EADS等研究机构针对不同的材料(如钛合金、镍基高温合金和铁基合金等)进行了工艺优化研究,使成形件缺陷大大减少,致密度增加,性能接近甚至超过同种材料锻造水平。例如,美国空军研究实验室Kobryn

等<sup>[11]</sup>对Ti6Al4V激光熔覆沉积成形工艺进行了优化,并研究了热处理和热等静压对成形件微观组织和性能的影响,大大降低了组织内应力,消除了层间气孔等缺陷,使成形件沿沉积方向的韧性和高周疲劳性能达到了锻件水平。德国汉诺威激光研究中心Rottwinkel等<sup>[12-13]</sup>利用感应加热对基体提前预热的方法解决了高温合金成形过程熔覆层开裂的问题,并应用于高温合金叶片的成形和修复。在国内,北京航空航天大学陈博等<sup>[14]</sup>主要研究了钛合金零件的LCD工艺,并通过热处理制度的优化,使钛合金成形件组织得到细化,性能明显提高,成功应用于飞机大型承力构件的制造,西安交通大学葛江波、张安峰和李涤尘等<sup>[15]</sup>则通过单道-多道-实体递进成形试验,研究了工艺参数对铁基合金和镍基合金材料成形件的尺寸精度、微观组织和力学性能的影响规律,并实现了对成形零件的精确成形和高性能成性一体化“控形控性”制造。

LCD技术在零件修复领域也得到了广泛应用,美国Sandia国家实验室和空军研究实验室、英国Rolls-Royce公司、法国Alstom公司以及德国Fraunhofer研究所等均对航空发动机涡轮叶片和燃气轮机叶片的激光熔覆修复工艺进行了研究并成功实现了定向晶叶片的修复,如图1(a)所示。此外,美国国防部研发的“移动零件医院”,如图1(b),将LCD技术应用于战场环境,可以对战场破损零件(如坦克链轮、传动齿轮和轴类零件等)进行实时修复,大大提高了战场环境下的机动性。

同时,利用LCD技术,通过混合粉末或控制喷嘴同时输送不同的粉末,可以成形金属-金属和金属-陶瓷等功能梯度材料。美国里海大学的Fredrick等<sup>[16]</sup>研究了利用LCD技术制造Cu与AISI 1013工具钢梯度功能材料的可行性,通过工艺优化以



(a) LCD 叶片修复



(b) 移动零件医院

图1 LCD修复技术实例

Fig.1 Examples of laser cladding deposition repair technology

及利用 Ni 作为中间过渡层材料,解决了梯度材料成形过程中两相不相容和熔覆层开裂的问题。美国南卫理公会大学的 MultiFab 实验室利用 LCD 技术成功制造了同时具有纵向和横向梯度的金属-陶瓷复合材料零件,如图 2 (a) 所示。斯洛文尼亚马里堡大学也对 Cu/H13 梯度材料的 LCD 工艺进行了研究,得到了无裂纹的 Cu/H13 梯度材料,且试样拉伸强度高于普通铸造铜,如图 2 (b) 所示。此外,美国 Sandia 国家实验室和密苏里科技大学等<sup>[17]</sup>研究机构也分别研究了 Ti/TiC、Ti6Al4V/In 625 和 In 718/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等不同材料的功能梯度零件 LCD 成形工艺。国内方面,西北工业大学杨海鸥、黄卫东等<sup>[18]</sup>研究了 316L/Rene 88DT 梯度材料的 LCD 成形工艺,并总结了熔覆层微观组织和硬度随着梯度材料不同成分含量变化而变化的规律。西安交通大学解航、张安峰等进行了 Ti6Al4V/CoCrMo 功能梯度材料的 LCD 研究<sup>[19]</sup>。此外,北京有色金属研究院席明哲等<sup>[20]</sup>研究了 316L/镍基合金/Ti6Al4V 的成形工艺,沈阳理工大学田凤杰等<sup>[21]</sup>则研究了梯度材料 LCD 成形同轴送粉喷嘴的设计。

LCD 设备的升级和改进也是国

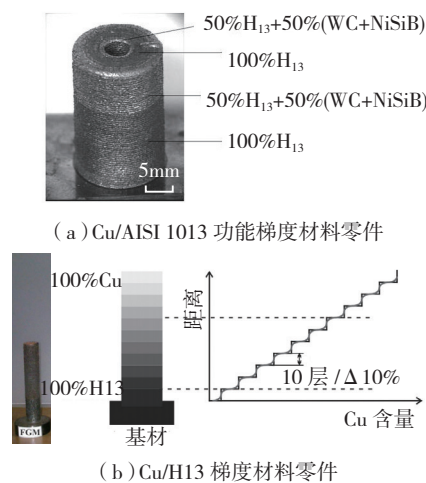
内外研究的热点之一。美国密苏里科技大学 Tarak 等<sup>[22]</sup>开发了 LAMP 加工系统,将 LCD 技术和 CNC 切削技术结合,在机床主轴上安装激光头,从而实现对熔覆成形后的零件实时加工,提高了生产效率,同时保证了零件精度。同样来自美国南卫理公会大学 MultiFab 实验室的研究人员将五轴联动技术应用于 LCD,通过工作台摆动旋转调整,从而克服悬臂件加工支撑的问题,可以成形各类复杂悬臂零件。德国 DMG MORI 公司开发的 LaserTec 65 同样将五轴联动切削加工与 LCD 结合起来,用于复杂形状模具、航空异形冷却流道等零件的加工制造。国内对于 LCD 设备的研究较少,目前西安交通大学正在研制一台五轴联动激光增材-减材一体化成形机。

## 2 国内外 SLM 技术最新研究进展

在 SLM 成形工艺方面,国内外研究者在缺陷控制、应力控制、成形微观组织演变和提高成形件力学性能等方面开展了大量研究工作。德国弗朗霍弗研究所 (Fraunhofer, ILT) 研究人员<sup>[23]</sup>在 SLM 成形不同臂厚的 AlSi10Mg 双悬臂梁时,对基板进行预热,发现当预热温度为 250 °C 时,有效地降低了因温度梯度产生的热应力,将成形件与基板分离后,

不同臂厚的双悬臂梁均未发生变形和开裂。利兹大学的 Olakanmi 等<sup>[24]</sup>总结了近年来世界范围内针对铝合金 SLM 成形的工艺、微观组织和力学性能的研究成果。曼彻斯特大学的 Majumdar 等<sup>[25]</sup>研究了 316L 不锈钢粉末 SLM 成形过程中微观组织的变化规律,发现试件上表面由于热量沿各个方向散热为等轴晶显微组织,试件下部由于热积累效应生长为粗大柱状组织,且能量密度越大,晶粒越大。拉夫堡大学的 Mumtaz 等<sup>[26]</sup>在 SLM 成形 Inconel625 薄壁件时,采用脉冲整形技术改变脉冲周期内的能量分布,有效减少了成形过程中的粉末飞溅,改善了成形件的表面质量。国内华南理工大学、华中科技大学、西安交通大学和苏州大学等在 SLM 成形工艺方面也做了大量研究。例如,苏州大学的钱德宇等<sup>[27]</sup>对 SLM 成形多孔铝合金进行了研究,分析了多孔铝合金的表面形貌、孔隙率、显微组织、相组成及微观力学性能,发现激光功率为 130W 时,孔隙率最大且多孔铝合金晶粒尺度达到纳米级别;激光功率变化对多孔铝合金的纳米硬度影响较大。华南理工大学的刘洋等<sup>[28]</sup>采用 SLM 成形了间隙尺寸为 0.2mm 的一系列倾斜角度的间隙特征,研究了成形厚度、倾斜角度和能量输入等工艺参数对间隙大小的影响,并成形了免组装的折叠算盘,如图 3 所示。

同时,国内外增材制造相关研究机构及企业也一直在致力于 SLM 设备的研发。自德国 Fockele & Schwarze (F&S) 与德国弗朗霍弗研究所 (Fraunhofer, ILT) 联合研制出第一台 SLM 设备以来,SLM 技术及设备研发得到迅速发展。国外对 SLM 设备的研发主要集中在德国、美国、日本等国家,目前这些国家均有专业生产 SLM 设备公司,如德国的 EOS、SLM Solutions、Concept Laser 公司;美国的 3D Systems 公司和日本的



(a) Cu/AISI 1013 功能梯度材料零件

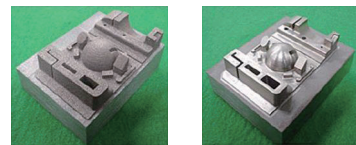
(b) Cu/H13 梯度材料零件

图2 功能梯度材料零件

Fig.2 Parts of functionally gradient materials

Matsuura 公司等。德国 EOS 公司推出了 EOS M100/M290/M400、EOSINT M280、PRECIOUS M080 型 SLM 设备,其中 EOS M400 型 SLM 设备最大成形尺寸为 400mm × 400mm × 400mm。SLM Solutions 公司研发的 SLM 500HL 型 SLM 设备最大成形尺寸为 500mm × 280mm × 365mm。2015 年,德国 弗 朗 霍 夫 研 究 所 (Fraunhofer, ILT) 和 Concept Laser 公司联合研发出 Xline2000R 型 SLM 设备,其最大成形尺寸达到 800 × 400mm × 500mm。目前,日本 Matsuura 公司研制出了金属光造型复合加工设备 LUMEX Avance-25,该设备将金属激光成形和切削加工结合在一起,激光熔化一定层数粉末后,高速铣削一次,反复进行这样的工序,直至整个零件加工完成,从而提高了成形件的表面质量和尺寸精度,与单纯的金属粉末激光选

区熔化技术相比,其加工尺寸精度小于  $\pm 5 \mu\text{m}$ ,图 4 为金属光造型复合加工原理示意图,图 5 为 SLM 技术与 SLM+ 铣削加工复合技术成形结果对比。国内方面,华中科技大学、华南理工大学、西北工业大学和西安交通大学等高校在 SLM 设备的研发方面做了大量的研究工作。其中,华南理工大学激光加工实验室与北京隆源公司合作研制了最新一款 DiMetal-100 型 SLM 设备,成形致密度近乎 100% 的金属零件,表面粗糙度  $R_a$  小于  $15 \mu\text{m}$ ,尺寸精度达 0.1mm/100mm。2016 年,华中科技大学武汉光电国家实验室的激光先进制造研究团队率先在国际上研制出成形尺寸为 500mm × 500mm × 530mm 的 4 光束大尺寸 SLM 设备,首次在 SLM 设备中引入双向铺粉技术,成形效率高出同类设备 20%~40%。



(a) SLM 技术 (b) SLM+ 铣削加工复合技术

图5 SLM技术与SLM+铣削加工复合技术成形结果对比  
Fig.5 Comparison of SLM and SLM+Milling technology

## 高性能金属零件激光增材制造技术的最新研究进展

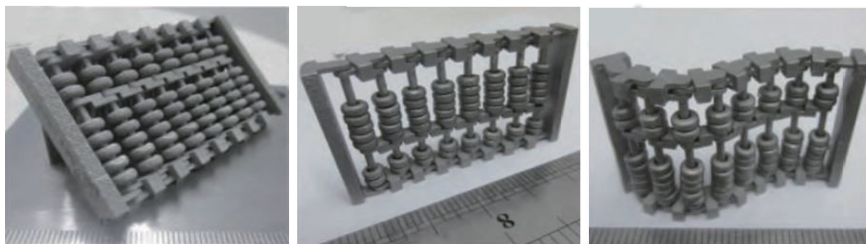
### 1 超声振动辅助LCD对IN718沉积态组织与性能的影响

LCD 是最为重要的增材制造技术之一,然而高温合金和高强度钢等材料的 LCD 零件内部容易产生应力、微气孔和微裂纹等缺陷,这些问题严重制约了其在航空航天、生物医疗等领域的应用步伐。借鉴超声振动在铸造、焊接领域中的除气、细化晶粒、均匀组织成分、减小残余应力的作用,超声振动被引入到 LCD 系统中,以获得高性能的金属成形件。图 6 为超声振动辅助 LCD 系统示意图。

超声振动辅助 LCD IN718 的试验结果表明:施加超声振动后,成形件的表面粗糙度和残余应力得到显著改善,微观组织得到细化,其抗拉强度和屈服强度得到提高;与未施加超声振动相比,当超声频率为 17kHz、超声功率为 44W 时,在  $x$  和  $y$  两个方向上残余应力分别降低了 47.8% 和 61.6%,屈服强度和抗拉强度略有提高,延伸率和断面收缩率分别达到 29.2% 和 45.0%,即延伸率和断面收缩率分别是锻件标准的 2.4 倍和 3 倍。这些结果表明超声振动辅助 LCD 为获得高质量和高性能的 LCD 件提供了一种有效途径。

### 2 感应辅助LCD DD4定向晶修复 DZ125L叶片的研究

LCD 高温合金时,高温合金具有很高的裂纹敏感性,裂纹一般表现为沿晶界开裂,并顺着沉积方向扩展,



(a) 表面处理前 (b) 表面打磨、喷砂处理后 (c) 表面处理后的折叠

图3 SLM直接成形折叠算盘

Fig.3 Collapsible abacus directly manufactured by SLM

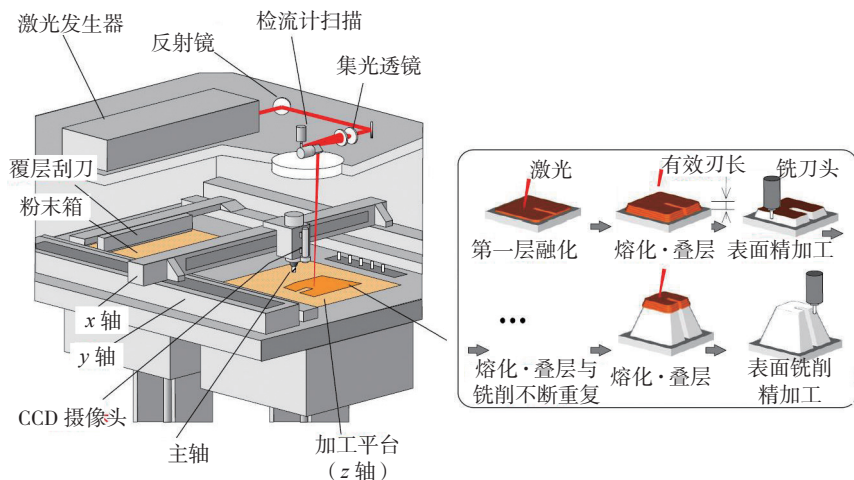


图4 金属光造型复合加工原理示意

Fig.4 Schematic of metal laser sintering hybrid manufacturing

严重影响高温合金的力学性能。而利用感应加热来辅助 LCD 能够很好地解决这些问题。通过感应加热可有效减小基体与熔覆层之间的温度梯度,一方面可以消除微观缺陷(微气孔和夹渣等);另一方面可以有效消除高温合金裂纹的形成。故感应辅助 LCD 技术可有效提高高温合金定向凝固组织的性能(见图 7)。

通过感应加热来控制 DD4 实体成形过程中的散热方向和正温度梯度,可以获得完整均匀外延生长的 DD4 柱状定向晶。此外,在感应加热辅助 LCD DD4 实体成形过程中,柱状晶一次枝晶间距的大小也发生了显著的变化,如图 8 所示,感应加热 1200℃ 时,柱状晶一次枝晶平均间距为 15.2 μm,无感应加热时经历的柱状晶一次枝晶平均间距为 2.5 μm,柱状晶一次枝晶间距增大了 5 倍,且柱状晶一次枝晶之间的横向晶界和裂纹完全消失,这对于提高 DD4 定向晶修复 DZ125L 叶片的高温性能具有重要意义,因为对于高温合金 DD4 在 1200℃ 高温下,柱状晶一次枝晶间距变大,晶界减少,对提高 DD4 高温性能是非常有利的,为 LCD DD4 柱状晶修复 DZ125L 定向晶叶片奠定了基础。

### 3 CuW 功能梯度复合材料的 LCD 工艺研究

用传统熔渗法或混粉烧结法生产的铜钨电触头,在使用过程中存在的一个主要问题是疲劳裂纹及掉渣现象(见图 9),即抗电弧侵蚀能力较差。从铜和钨两种材料的物理性质而言,虽然铜的熔点仅为 1083℃,沸点为 2595℃,但铜对激光具有高反射高导热的特点;而钨的熔点则高达 3422℃,沸点为 5655℃。铜钨两者的热物理特性相差太大,钨的密度和沸点是铜的两倍多,钨的熔点是铜的 3 倍多,在钨还未熔化时,铜已经汽化了,需要足够高的功率密度才能进行铜和钨的 LCD 试验。因此,采用感应辅助 LCD 技术,可成形 CuW 功能梯度材料零件(见图 10),成形零件具有良好的综合力学性能。本试验重点研究 CuW 复合材料感应辅助 LCD 的成形工艺,解决 Cu 的高导热、对激光的高反射率问题,研究 CuW 材料 LCD 的润湿机制、缺陷形成机制,使成形的 CuW 复合材料满足使用的力学性能和电学性能要求。

试验结果显示,在感应加热温度为 400℃ 的条件下,试样的成形质量最好。随后在 400℃ 预热铜基板上

成形 W 的质量分数分别为 50%、60%、70% 和 80% 的 CuW 复合材料(见图 11),以及在 CuW 复合材料成形工艺参数的基础上,成形了 CuW 功能梯度材料,并分析了 CuW 梯度复合材料的

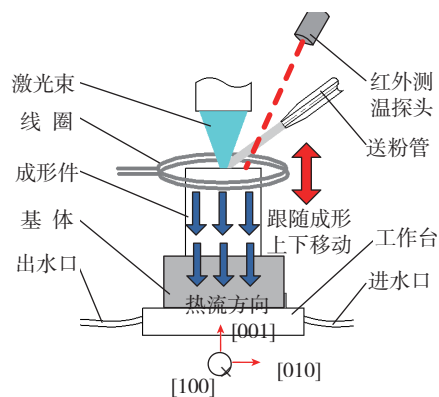
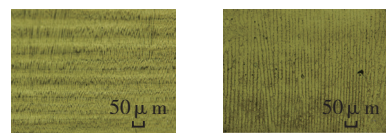


图7 感应辅助LCD技术示意图  
Fig.7 Schematic diagram of the induction-assisted laser cladding deposition technology



(a) 无感应加热 (b) 感应加热 1200℃

图8 无感应加热和感应加热1200℃下DD4熔覆层定向晶显微组织

Fig.8 Directional crystal microstructures of the DD4 cladding layers with no induction heating and 1200℃ induction heating

的显微组织和 W 颗粒分布的均匀性。扫描电镜照片显示在 W 的含量为 70% 和 80% 时, W 颗粒分布比较均匀,但所有成形试样中都存在极少量微气孔,进一步试验表明,激光表面重熔工艺可以有效减少成形试样中的气孔。

### 4 送粉气纯度对激光熔覆 Fe314 修复 40Cr 组织与性能的影响

与惰性气体相比,氮气可以通过氮气发生器从空气中制取,更适用于野外、工矿、能源动力等多变复杂环境下失效零件的快速应急修复,使设备快速恢复正常使用,可以节约资源、降低经济损失,具有重要的工程应用价值。选用 99.999% N<sub>2</sub>、99.5% N<sub>2</sub>、98% N<sub>2</sub> 3 种不同纯度的氮气送粉,在无保护的大气环境中进行激光熔覆 Fe314 修复 40Cr 试验,探讨送粉气的纯度对修复零件组织与性能的影响,为熔覆修复系统选择合适纯度氮气发生器确定科学依据。

试验结果表明:在一定范围内,

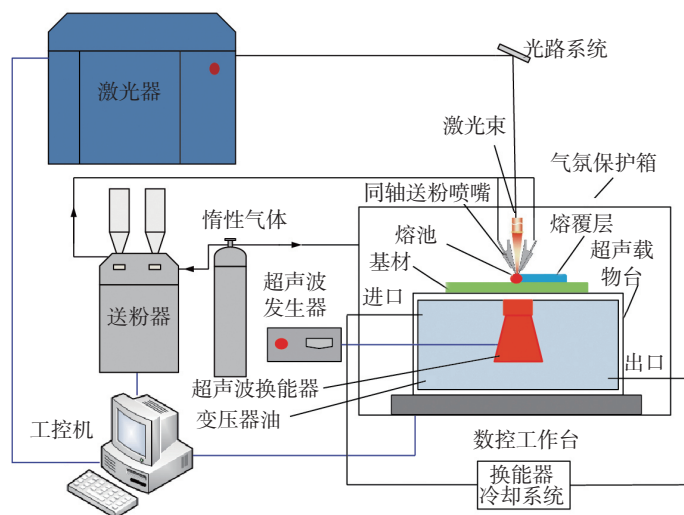


图6 超声振动辅助LCD系统示意图

Fig.6 Schematic diagram of the ultrasonic vibration assisted laser cladding deposition system

随着氮气纯度的降低,熔覆层组织残留的夹渣物略有增加,但对修复后的力学性能影响很小,采用纯度98%~99.5%的氮气发生器完全满足修复性能要求。3种不同纯度氮气送粉气条件下 Fe314 修复 40Cr 试样



图9 CuW电触头表面龟裂失效形貌  
Fig.9 Surface crack morphology of CuW electrical contacts

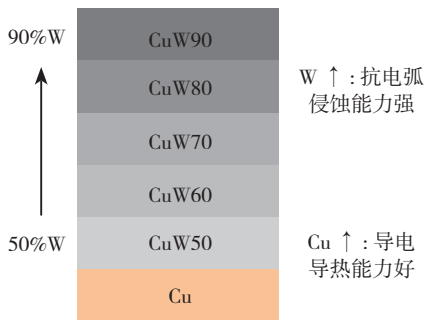


图10 CuW功能梯度材料电触头示意  
Fig.10 Schematic diagram of the CuW functionally gradient composites electrical contacts

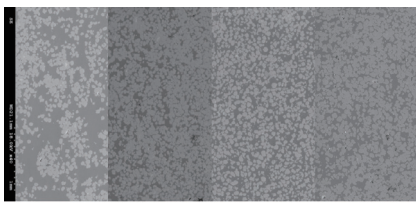
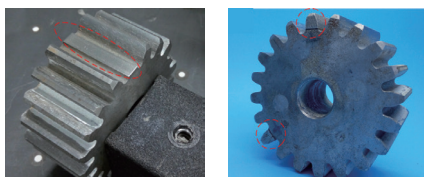


图11 LCD CuW梯度材料显微组织形貌  
Fig.11 Microstructures of the CuW functionally gradient materials by laser cladding deposition



(a) 修复前 (b) 修复后

图12 激光熔覆Fe314修复40Cr齿轮断齿照片  
Fig.12 Broken teeth repair of 40Cr gear with Fe314 by laser cladding

的抗拉强度均不低于 1001MPa,延伸率不低于 10%,硬度约 HV0.2430,均超过基体的力学性能。图 12 为采用 Fe314 激光熔覆修复 40Cr 中碳钢齿轮零件的案例,熔覆层与基体为冶金结合,结合面处力学性能大于 40Cr 本体,可以实现野外及工况环境下齿类零件的快速应急修复。

### 结束语

高性能金属零件 LAM 技术作为一种兼顾精确成形和高性能需求的一体化制造技术,已经在航空航天、生物医学、汽车高铁、产品开发等领域显示了广阔和不可替代的应用前景。但是,相比于传统铸锻焊等热加工技术和机械加工等冷加工技术,LAM 技术的发展历史毕竟才 30 年,还存在制造成本高、效率低、精度较差、工艺装备研发尚不完善等问题,尚未进入大规模工业应用,其技术成熟度相比传统技术还有很大差距。特别是 LAM 专用合金开发的滞后、LAM 构件无损检测方法的不完善以及相关 LAM 技术系统化、标准化的不足,在很大程度上制约了 LAM 技术在工业领域的应用。除此之外,LAM 合金的力学性能和成形几何精度控制也远未达到理想状态,这一方面来自于对这些合金在 LAM 和后续热处理过程中的控形和控性机理的研究和认识不够系统深入,另一方面来自于对 LAM 过程的控制不够精细。这也意味着,对于 LAM 技术,仍有大量的基础和应用研究工作有待进一步完善。增材制造以其制造原理的突出优势成为具有巨大发展潜力的先进制造技术,随着增材制造设备质量的大幅度提高,应用材料种类的扩展和制造效率与精度的提高,LAM 技术必将给制造技术带来革命性的发展。

### 参考文献

[1] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打

印)技术发展[J].机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.

LU Bingheng, LI Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machine Building and Automation, 2013, 42(4): 1-4.

[2] KOCH J L, MAZUMDER J. Rapid prototyping by laser cladding[C]// Laser material processings of ICALEO' 93. Orlando: Spie2306, 1993: 556-557.

[3] MURPHY M L, STEEN W M, LEE C. A novel prototyping technique for the manufacture of metallic components[C]// Proceeding of ICALEO' 1994. Orlando: Laser Institute of America, 1994: 31-40.

[4] XUE L, ISLAM M. Free-form laser consolidation for production functional metallic components[C]// Proceeding of ICALEO' 1998. Orlando: Laser Institute of America, 1998: 15-24.

[5] GREMAUD M, WAGMIERE J D, ZRYD A, et al. Laser metal forming: process fundamentals [J]. Surface Engineering, 1996, 12(3): 251-259.

[6] GRIFFITH M L, KEICHER D M, ATwood C L, et al. Freeform fabrication of metallic components using laser engineered net shaping LENS[C]// Solid freeform fabrication symposium proceedings. Austin, TX: University of Texas at Austin Publishers, 1996: 125.

[7] MAH R. Directed light fabrication[J]. Advanced Materials & Processes, 1997, 151(3): 31-33.

[8] ABBOTT D H, ARCELLA F G. Laser forming titanium components[J]. Advanced Materials and Processes, 1998(5): 29-30.

[9] WU X, SHARMAN R, MEI J, et al. Direct laser fabrication and microstructure of a burn-resistant Ti alloy[J]. Materials and Design, 2002, 23(3): 239-247.

[10] PI G, ZHANG A F, ZHU G X, et al. Research on the forming process of three-dimensional metal parts fabricated by laser direct metal forming[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 57(9-12): 481-487.

[11] KOBRYN P A, SEMIATIN S L, et al. Mechanical properties of laser-deposited Ti-6Al-4V. Air Force Research Laboratory/0704-0188 [R]. Ohio: Wright-Patterson Air Force Base, 2006.

[12] ROTTWINKEL B, NÖLKE C, KAIERLE S, et al. Crack repair of single crystal turbine blades using laser cladding technology[J].

Procedia CIRP, 2014, 22: 263–267.

[13] ROTTWINKEI B, NÖLKE C, KAIERLE S, et al. Challenges for single-crystal (SX) crack cladding[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 301–308.

[14] 陈博, 邵冰, 刘栋, 等. 热处理对激光熔化沉积 TC17 钛合金显微组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(4):49–55.

CHEN Bo, SHAO Bing, LIU Dong, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of laser melting deposited TC17 titanium alloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 49–55.

[15] 葛江波, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形 DZ125L 高温合金零件工艺的研究[J]. 中国激光, 2011, 38(7): 119–125.

GE Jiangbo, ZHANG Anfeng, LI Dichen, et al. Process research on DZ125L superalloy parts by laser metal direct forming[J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(7): 119–125.

[16] FREDRICK F, NOECKER II, JOHN N, et al. Microstructural development and solidification cracking susceptibility of Cu deposits on steel: part I [J]. Journal of Materials Science, 2007, 42(2): 495–509.

[17] JACQUELYN K S N, FRANK W L. Manufacturing system[M]. Rijeka: InTech, 2012: 223–247.

[18] 杨海鸥, 林鑫, 陈静, 等. 利用激光快速成形技术制造高温合金 - 不锈钢梯度材料[J]. 中国激光, 2005, 32(4): 567–570.

YANG Haiou, LIN Xin, CHEN Jing, et al. Functionally gradient materials prepared with

laser rapid forming [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 567–570.

[19] 解航, 张安峰, 李涤尘, 等. 激光金属直接成形 Ti6Al4V-CoCrMo 梯度材料开裂研究[J]. 中国激光, 2013, 40(11): 89–95.

XIE Hang, ZHANG Anfeng, LI Dichen, et al. Research on the cracking of Ti6Al4V-CoCrMo gradient material fabricated by laser metal direct forming[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(11): 89–95.

[20] 席明哲, 张永忠, 涂义, 等. 激光快速成形 316L 不锈钢 / 镍基合金 / Ti6Al4V 梯度材料[J]. 金属学报, 2008, 44(7): 826–830.

XI Mingzhe, ZHANG Yongzhong, TU Yi, et al. 316L stainless steel/Ni-based alloy/Ti6Al4V gradient materials prepared by laser rapid forming process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(7): 826–830.

[21] 田凤杰, 韩辉. 功能梯度材料激光快速成形同轴送粉系统设计[J]. 沈阳理工大学学报, 2008, 27(6): 48–50.

TIAN Fengjie, HAN Hui. Design of coaxial powder feeding system for FGM laser rapid shaping[J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2008, 27(6): 48–50.

[22] TARAK A A, TODD E S, FRANK L. A strategy for fabricating complex structures via a hybrid manufacturing process[C] // The 21st Annual Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin: University of Texas Press, 2011:175–184.

[23] SEBASTIAN B, WILHELM M, ANDREI D. Selective laser melting—a

manufacturing technology for the future[J]. Laser Technik Journal, 2012,9(2):33–38.

[24] OLAKANMI E O, COCHRANE R F, DALGARNO K W. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: processing, microstructure, and properties[J]. Progress in Materials Science, 2015,74:401–477.

[25] MAJUMDAR J D, PINKERTON A, LIU Z, et al. Microstructure characterisation and process optimization of laser assisted rapid fabrication of 316L stainless steel[J]. Applied Surface Science, 2005, 247:320–327.

[26] MUMTAZ K A, HOPKINSON N. Selective laser melting of thin wall parts using pulse shaping[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010,210(2):279–287.

[27] 钱德宇, 陈长军, 张敏, 等. 选区激光熔化成形多孔铝合金的显微组织及微观力学性能研究[J]. 中国激光, 2016,43(4):60–67.

QIAN Deyu, CHEN Changjun, ZHANG Min, et al. Study on microstructure and micro-mechanical properties of porous aluminum alloy fabricated by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(4): 60–67.

[28] 刘洋, 杨永强, 王迪, 等. 激光选区熔化成型免组装机件的间隙特征研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 88–95.

LIU Yang, YANG Yongqiang, WANG Di, et al. Study on the clearance feature of non-assembly mechanism manufactured by selective laser melting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 88–95.

## Development of Laser Additive Manufacturing of High-Performance Metal Parts

ZHANG Anfeng, LI Dichen, LIANG Shaoduan, WANG Tan, YAN Shenping, ZHANG Lianzhong  
(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

**[ABSTRACT]** Laser Additive Manufacturing (LAM) is recognized as an advanced manufacturing technology with integration of precision forming and high-performance forming. Initially, principles and characteristics of two representative LAM technologies are introduced respectively, following which the research developments of Xi'an Jiaotong University in the field of LAM technology are emphatically introduced from the following aspects: (1) The effects of ultrasonic vibration assisted laser cladding deposition process on the as-deposited microstructures and properties of IN718; (2) Repair of directionally solidified DZ125L blades with DD4 by induction-assisted laser cladding deposition process; (3) The laser cladding deposition process of CuW functionally gradient composite materials; (4) Effects of the purity of powder carrier gas on the microstructures and properties of 40Cr repaired with Fe314 by laser cladding. Ultimately, the challenges that LAM technology may confront with are explained.

**Keywords:** Laser additive manufacturing; Laser cladding deposition; Selective laser melting

(责编 玲犀)