

激光金属沉积技术研究现状与应用进展*

杨胶溪¹, 柯华¹, 崔哲¹, 刘琦^{2,3,4,5}, 李怀学^{2,3,4,5}, 周正⁶, 肖俊恒⁶, 张志勇⁷

(1. 北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124; 2. 中国航空制造技术研究院, 北京 100024; 3. 高能束流增量制造技术与装备北京市重点实验室, 北京 100024; 4. 国家级高能束流加工技术重点实验室, 北京 100024; 5. 增材制造航空科技重点实验室, 北京 100024; 6. 高速铁路轨道技术国家重点实验室, 北京 100081; 7. 特冶(北京)科技发展有限公司, 北京 100043)

[摘要] 增材制造是融合材料科学、机械自动化及信息技术的先进制造技术,在近 30 年的发展中,发挥着越来越重要的作用。激光金属沉积(Laser metal deposition, LMD)是基于定向能量沉积(Directed energy deposition, DED)的一种增材制造技术,在近年来受到广泛关注和研究。阐述了 LMD 技术的基本工作原理及系统组成,重点介绍 LMD 技术国内外研究进展及应用现状,列举了一些基于 LMD 的工艺技术开发及装备研发制造,指出了 LMD 技术在成形效率和成形精度、工艺稳定性及性能一致性等方面的不足。最后,总结了 LMD 技术未来的 5 个发展趋势:材料体系集约化、工艺参数系统化、成形过程高效化、设备集成智能化和应用领域广泛化。

关键词: 增材制造(AM);定向能量沉积(DED);激光金属沉积(LMD);快速成形(RP)

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.10.014



杨胶溪

博士,副研究员,研究方向为高性能材料的激光增材制造技术、舰载动态环境的激光 3D 技术及装备。主持及参与多项国家及北京市基金项目;发表学术论文 60 余篇,获国家发明专利及实用新型共 30 余项;获中国高校科学技术进步二等奖、山东省科技进步二等奖、山东电力科学技术奖各 1 项。

增材制造(Additive manufacturing, AM)被定义为一种通过三维模型数据,将材料逐层累加,从而形成实体的快速成形技术,采用与传统“减法”制造相反的“加法”制造^[1]。自 21 世纪以来,增材制造以其独特的优势为制造业开辟了一个新的先进制造技术,被众多国家视为未来产业发展的新增长点。美国《时代》周刊、英国《经济学家》杂志、麦肯锡咨询公司等认为增材制造将是改变未来生产生活方式的颠覆性技术。欧美等发达国家相继发布各自的“未来工业计划”,明确提出

将增材制造作为国家战略发展。

金属材料的增材制造在材料领域中体量大,凸显其重要性且难点较多,是先进制造技术主要的研究方向。依据工艺原理的不同,金属材料增材制造技术可以分为定向能量沉积(Directed energy deposition, DED)和粉末床熔化(Powder bed fusion, PBF)两大类。定向能量沉积是利用激光、等离子弧、电子束等聚焦热能,将金属粉末或丝材熔化沉积的一种增材制造工艺^[2]。以激光作为热源的 DED 技术又被称为激光金属沉积(Laser metal deposition, LMD)技术,

* 基金项目: 高速铁路轨道技术国家重点实验室项目(1853TJ7804)。

是目前主流的增材制造技术之一。LMD技术的应用主要有3个方面:所需零部件快速成形、现有零部件结构添加和受损零部件直接修复,涉及航空航天、汽车制造、轨道交通、石油化工、船舶工业、模具制造等行业。

LMD 技术原理及简介

早期有关LMD的概念出现在1988年的一篇专利上,描述了利用激光对添加的金属粉末进行熔化沉积用于修复受损零件的方法^[1]。1990年以后,LMD技术有了较快的发展,各研究机构依据对LMD的理解及自身研究特点,赋予了LMD技术不同的名称。表1列出了不同研究机构对LMD技术的命名。

LMD技术使用激光束作为高温热源将基材表面熔化产生熔池,通过送粉/送丝设备将金属粉末/丝材同步送入熔池,粉末/丝材经过快速熔化冷却后凝固并与基材材料形成冶金结合,激光沉积工作头在计算机控制下按照预先规划好的路径移动,并通过逐层堆积的方式实现零部件实体制造^[13]。依据沉积材质的不同,整个过程通常需要在氩气、氮气等惰性气体氛围中进行。

LMD增材制造系统主要由激光沉积系统、运动控制系统和防护监测系统组成。激光沉积系统是

增材制造系统的核心,主要由激光器、送粉/送丝设备、冷却器、沉积头和成形平台组成,用于材料输送并熔化沉积到成形平台上;运动控制系统主要由CNC机床/机械臂、程序控制器及CAM编程软件组成,用于实现沉积头/成形平台的空间定位移动,对不同形状的构件进行制造;防护监测系统主要由安全外壳、气体室、在线监测设备及配套软件组成,用于保护加工安全,监测整个成形过程保证加工精度。图1所示为典型LMD系统原理示意图。

LMD技术主要有以下特点^[14]:(1)无需模具,成形尺寸不受限制,可实现大尺寸零件直接成形;(2)灵

活性高,无需支撑就可加工复杂零件;(3)可用于受损零件直接修复,多梯度零件制造;(4)加工周期短,材料利用率高,后期加工少;(5)成形零件的室温综合力学性能优异,热处理后的零件力学性能可达锻件水平。

研究与应用现状

1 材料及工艺研究

LMD技术通常采用直径为45~150 μm 的球形金属粉末或直径为0.8~3mm的金属丝材作为成形材料^[2]。目前应用较为广泛的合金材料有以Ti-6Al-4V(TC4)为代表的钛合金,以AlSi10Mg为代表的铝

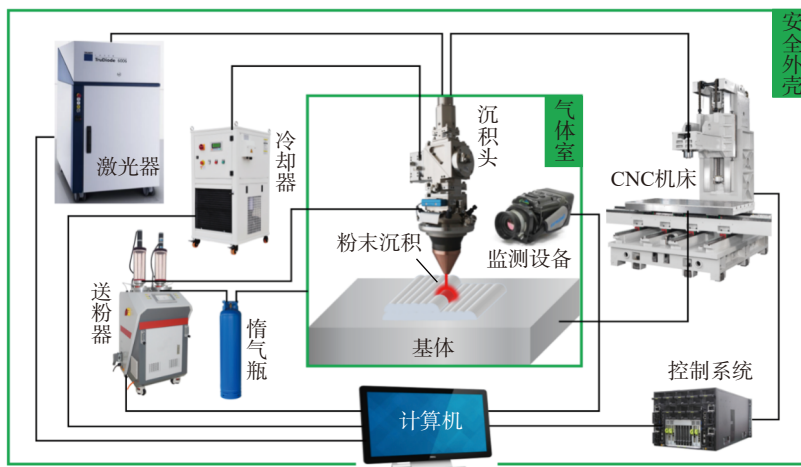


图1 典型LMD成形系统原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical LMD forming system

表1 LMD技术命名

Table 1 Named LMD technology

命名机构	中文全称	英文全称	英文缩写	参考文献
美国 Sandia 国家实验室	激光近净成形	Laser Engineered Net Shaping	LENS	[4]
美国 Los Alamos 国家实验室	定向光制造	Directed Light Fabrication	DLF	[5]
美国密歇根大学	直接金属沉积	Direct Metal Deposition	DMD	[6]
美国斯坦福大学	形状沉积制造	Shape Deposition Manufacturing	SDM	[7]
英国伯明翰大学	直接激光制造	Direct Laser Fabrication	DLF	[8]
英国利物浦大学	激光直接铸造	Laser Direct Casting	LDC	[9]
德国 Fraunhofer 研究所	受控金属堆积	Controlled Metal Build Up	CMB	[10]
瑞士洛桑联邦理工学院	激光金属成形	Laser Metal Forming	LMF	[11]
中国西北工业大学	激光立体成形	Laser Solid Forming	LSF	[12]

合金、以 316L 为代表的 316 不锈钢、以 300M 为代表的高强钢、以 H13 为代表的模具钢、以 Incone718 (GH4169) 为代表的镍基高温合金以及铜合金、钨合金等。针对成形过程: 激光功率、扫描速度、扫描策略、光斑大小、送粉 / 送丝速率、搭接率等典型 LMD 技术的工艺参数, 结合锻造轧制、电磁感应、超声振动、元素添加、热处理等辅助工艺, 对整体工艺的稳定性及可靠性进行优化。

早在 20 世纪末, 美国 Sandia 国家实验室、Los Alamos 国家实验室等^[5, 15-16]就采用 LENS 技术和 DLF 技术对 H13 模具钢、316 不锈钢、Inconel690 镍基高温合金、Ti-6Al-4V 钛合金等金属材料的成形工艺进行了研究。近几年, 德国 Fraunhofer 研究所^[17-18]对 LMD 技术的工艺步骤进行了详细描述, 采用不同工艺参数成形 Ti-6Al-4V 圆柱及 Incone718 方块, 用于研究不同工艺参数的适用性, 并将优化的工艺用于成形 Ti-6Al-4V 合金涡轮叶片上的纵树形榫头。瑞士苏黎世理工学院的 Dalace 等^[19]对电磁感应加热辅助激光直接金属沉积 (IH-DMD) 工艺进行了研究, 结果表明 IH-DMD 工艺可将成形效率提高 3 倍。西安交通大学卢秉恒院士等^[20]对悬垂结构空间可变取向激光金属沉积进行了研究, 并成功制造具有悬垂结构的“花瓶”形金

属零件, 最大悬垂角度达到了垂直方向的 80°。西安交通大学张安峰等^[21]通过在激光增材制造 Ti-6Al-4V 的过程中添加变质剂 (硼、硅) 辅以感应加热和热处理的方法细化晶粒并改善微观组织, 以获得高性能钛合金试样, 采用超声冲锻辅助激光增材制造工艺对 Ti-6Al-4V 微观组织和各向异性的影响进行了研究。北京工业大学杨胶溪等^[22-26]对激光增材制造无磁复合材料、镍基耐磨抗腐蚀材料、软磁材料的制备工艺及冶金机理进行了研究, 采用 EET 理论、第一性原理等方法研究了磁性控制机理, 并通过添加合金元素对材料性能进行调控, 用于制备高性能梯度结构。

2 成形质量检测与分析

成形质量的检测分析是评估工艺参数适用性的重要手段, 包括: 成形精度、组织结构、机械性能 (硬度、摩擦磨损、抗拉强度、残余应力及疲劳强度等) 和缺陷 (未熔合、裂纹及气孔等)。检测技术分为机械检测 (拉伸、压入、冲击等)^[27] 和无损检测 (超声、射线、工业 CT、荧光渗透等)^[28]。目前激光增材制造 Ti-6Al-4V、Incone718 等材料的工艺已较为成熟, 经过热处理后的零件力学性能与传统工艺制造的零件相当。表 2 给出了常用的几种合金材料在不同制备工艺下的室温力学性能。

相关研究方面, 美国 Sandia 国家

实验室与 California 大学合作^[29-30], 深入研究了 316L 不锈钢的工艺参数对成形质量、微观结构及力学性能的影响, 并讨论了微观结构的演变和缺陷的形成。澳大利亚 RMIT 增材制造中心的 Barr 等^[31]研究了激光金属沉积过程中残余热量对 300M 马氏体钢原位回火的作用, 并对不同延迟策略下样品的微观结构和硬度进行分析。西北工业大学黄卫东等^[32-37]采用 LSF 技术对 Ti-6Al-4V、Inconel718、DZ125、Rene88DT、AlSi10Mg 及钨合金等材料成形及修复的组织结构及力学性能等方面进行了研究。北京航空航天大学王华明院士团队^[38-39]针对高性能大型钛合金构件的激光直接沉积进行了若干研究。陆军装甲兵学院董世运等^[40]采用超声无损检测方法对激光直接金属沉积合金钢样件的力学性能进行评价, 并建立了硬度、强度、微观组织与超声声速之间的映射关系。

3 模型建立与数据处理

零件三维模型的建立可分为直接法和反求法两种, 直接法采用 Solid Works、Pro/E、UG、Inventor、Rhino 等 CAD 软件在计算机上直接构建出零件的几何模型, 反求法则利用 Imageware、Geomagic Studio、CopyCAD、RapidForm 等逆向工程软件, 对现有零件进行扫描并在计算机中生成三维模型。目前主流的三

表2 合金室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of alloys at room temperature

材料	工艺	抗拉强度 σ_0 /MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	伸长率 δ /%	参考文献
Ti-6Al-4V	LMD-沉积态	914~932	870~882	8.6~11.6	[17]
	锻造标准	~860	~758	~8	
316L	LENS-沉积态	545~634	448~455	38	[29]
	锻造标准	~450	~170	~40	
Inconel718	LSF-热处理	1182~1351	986~1184	17.2~18.86	[32]
	锻造标准	~1340	~1100	~12	
AlSi10Mg	LSF-沉积态	340~356	203~210	3.2~4.5	[36]
	锻造标准	~305	~170	~2.5	

维模型数据处理方法是先将 CAD 模型转为 STL 数据,再对 STL 数据进行诊断修复、分层切片、路径规划及数控代码生成。其中,基于 STL 模型的分层切片算法包括等层厚分层、自适应分层和曲面分层等^[41]。路径规划方法包括光栅式扫描、轮廓偏置扫描及分区分形扫描等。

目前,对于分层算法和路径规划的研究,主要集中在提高其精确性、稳定性和效率方面。北京航空航天大学 Zhao 等^[42]提出了基于分解的曲面分层和基于变换的圆柱面分层两种非平面分层策略,与平面分层相比,曲面分层的层数下降了 13%,实现了大角度悬垂结构无支撑打印。哈尔滨工业大学金宇鹏^[43]对 STL 模型的曲面分层算法进行了改进,提高了分层效率,同时实现了基于中轴线的轮廓偏置扫描方法,有效减少了路径中断的次数。天津科技大学刘少岗等^[44]提出了一种新的基于 STL 模型的自适应分层算法,该算法简化了分层参数处理过程,并提高了模型分层轮廓的精细度。

4 过程模拟与仿真

可用于 LMD 技术仿真的软件有 ANSYS、COMSOL、SIMUFACT、FLOW-3D、AMProSim 等。过程涉及宏观、介观、微观和多尺度多物理场的模拟仿真^[45]。借助计算机模拟仿真技术,能够充分地认识激光增材制造过程的熔池形貌、温度场、微观结构、变形及残余应力、缺陷等变化规律。

美国 Sandia 国家实验室^[46]采用有限元分析方法(FEA)建立了激光直接沉积 304L 不锈钢管的三维模型,对成形过程的温度场进行模拟,用于预测残余应力及微观组织的演变,并将模拟结果与试验结果进行了比较。英国诺丁汉大学 Bennett 等^[47]提出了一种用于预测 Inconel 718 镍基高温合金成形过程沉积层几何形状及热-力场变化的仿真模型,与实际试验相比,模型的沉积层高度及

宽度误差分别为 6.5% 和 7.6%,温度场和残余应力误差分别为 6.2% 和 11.4%。苏州大学石世宏等^[48]基于三光束光内送丝技术,采用 ANSYS 软件对不同参数下激光熔覆成形碳钢材料熔池的温度场进行仿真,通过仿真与试验分析对工艺参数进行优化。

5 在线监测及闭环控制

增材制造过程通常会由于误差累积而导致成形精度下降,为了能够将整个成形过程的误差控制在允许的范围之内,需要对增材制造过程进行闭环控制。即对增材制造过程的熔池温度、成形宽度/高度、送粉/送丝速率等进行监测,通过反馈信号在线调整激光功率、扫描速度等参数,控制整个成形过程保持在一定误差范围之内,从而实现高质量的增材制造。

俄罗斯科学院 Dubrov 等^[49-50]对 LMD 成形过程中激光作用于气粉混合物(GPM)的温度分布进行了研究,并提出了一种熔池温度在线监测的方法。日本三菱先进技术研发中心与大阪大学合作^[51],开发了一种激光沉积高度在线测量和送丝速度反馈控制系统,该系统可以控制沉积高度与送丝速度保持在最佳范围内。湖南大学宋立军等^[52]设计了一套基于状态空间模型,可实现熔池温度定量控制激光增材制造熔池温度预测控制系统,有效减少了熔池波动及基板变形。

6 应用现状

激光快速成形方面,主要针对大型金属构件直接制造,解决难加工材料成形问题,以降低制造成本,缩短生产周期。早在 2000 年美国国防部和海军研究院主导的“钛合金柔性制造”项目就成功制造了战斗机 F/A-18E/F 机翼翼根吊环和降落连杆,零件的性能超过传统制造工艺,成本减少了 20%,周期更是缩短了 75%^[53]。英国航空航天和汽车制造商 GKN 将 LMD 技术用于

Vulcain 2.1 火箭喷嘴结构加固及关键连接部件成形,使用了超过 50kg 的镍基超高温合金,火箭喷嘴零件数量减少 90%,成本降低 40%,生产时间减少 30%^[54]。美国国家航空航天局 NASA 将开发的送丝 LMD 技术用于火箭喷嘴部件制造,如图 2(a)所示。美国 RPM Innovations 公司采用 LMD 技术一体成形弯管零件,4 个弯折处的角度都达到了 90°,如图 2(b)所示。德国 DMG Mori 利用 LMD 技术打印多个 316L 不锈钢零件,如图 2(c)所示。西北工业大学采用 LSF 技术为国内首架自研的 C919 大型客机制造了钛合金中央翼缘条,尺寸长达 3070mm,如图 2(d)所示。北京航空航天大学通过激光直接沉积技术制造飞机钛合金主承力构件加强框等多种大型钛合金部件如图 2(e)所示。南京中科煜宸采用自主研发的增材制造设备沉积成形发动机叶片如图 2(f)所示。

结构添加方面,通过在现有零件表面熔覆不同材料,从而提高零件的防腐、耐磨、耐高温等性能。美国 DM3D 公司在铜基上沉积工具钢制造汽车部件模具,使得模具在注塑过程既保持了强度和耐磨性,又提高了冷却速率。德国 Trumpf 公司采用 LMD 技术在铝压铸件表面添加铝合金结构,以提高零件整体性能,如图 3(a)所示。法国 BeAM 公司在 304 不锈钢零件表面添加网状结构的 Inconel 625 镍基高温合金材料,如图 3(b)所示。北京工业大学与铁道科学研究院、特冶(北京)科技发展有限公司合作在 U75V 和 U20Mn 贝氏体钢轨上沉积高性能材料,提高新型辙叉的抗冲击、抗滚动接触疲劳性能,如图 3(c)所示。修复再制造方面,LMD 技术提供了一种可靠的修复、重建零件受损区域的方法,大大降低了更换相应零件带来的成本。图 3(d)为美国 Optomec 公司采用 LENS 技术修理磨损的齿轮

轴承。图3(e)为美国罗切斯特理工学院(RIT)为汉斯福德零部件产品公司修复受损齿轮。图3(f)为西北工业大学采用LSF技术对某型号发动机高压一级涡轮叶片进行修复,已装机应用超过50台份。

工艺技术开发及装备制造

1 工艺技术开发

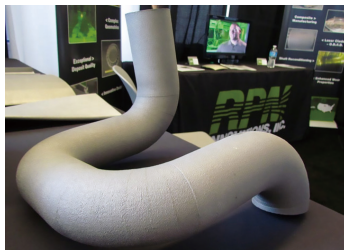
新技术的开发有助于推动设备

更新换代,更好地服务市场需求。美国 Formally 3D 打印公司率先将450nm 蓝色波长激光器(NUBURU 公司研发)应用到增材制造,金属材料吸收效果比工业标准的红外波长激光器高出3~20倍,材料成形效率、精度、质量有很大的提高。德国 Fraunhofer 激光技术研究所开发了送丝激光金属沉积(Wire based Laser Metal Deposition, LMD-W)技术,

该技术采用横向送丝方式,材料利用率可达到100%,英国 GKN 航空公司和美国能源部橡树岭国家实验室(ORNL)也在进行相应研究,并计划将该技术用于制造大尺寸高质量的飞机零部件。德国 Precitec 公司研制的 CoaxPrinter 金属沉积头,采用激光同轴送丝工艺,具有极高的沉积效率,如图4(a)所示。美国 Additec 公司发明的专利激光光内金



(a) NASA 火箭喷嘴部件



(b) RPM Innovations 弯管零件



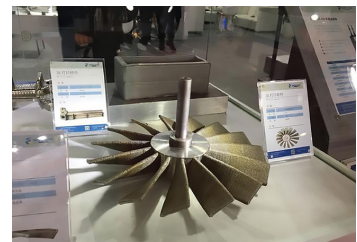
(c) DMG Mori 316L 不锈钢零件



(d) 西北工业大学客机中央翼缘条



(e) 北京航空航天大学飞机承力构件加强框



(f) 南京中科焜宸发动机叶片

图2 LMD技术成形零件

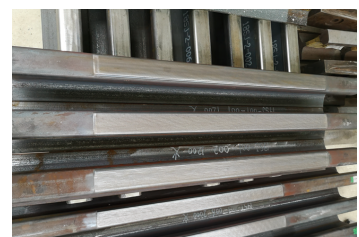
Fig.2 LMD technology forming parts



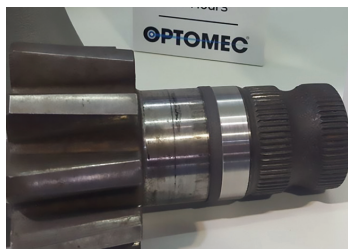
(a) Trumpf 公司铸件表面结构添加



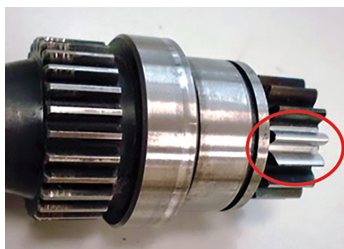
(b) BeAM 公司零件表面网状结构添加



(c) 北京工业大学激光熔覆制备新型辙叉



(d) Optomec 磨损轴承修复



(e) RIT 受损齿轮修复



(f) 西北工业大学发动机涡轮叶片修复

图3 LMD技术结构添加及修复

Fig.3 LMD technology structure addition and repair

属沉积线材/粉材(LMD-WP)工艺技术,开创性的将送粉和送丝技术结合,在单独进给粉末或丝材的同时,还可实现丝粉同时进给,图4(b)所示为采用该技术的 μ Printer金属沉积头。苏州大学开发的中空环形激光光内送粉工艺技术,利用圆环-圆锥双反射镜对入射激光束进行分割-聚焦,形成环形光斑,送粉喷嘴被包裹在环形激光束内,避免了粉末分流,大大提高了粉末利用率。

2 装备研发制造

国外方面,美国Optomec Design公司最早推出商业化设备,该公司通过与美国Sandia国家实验室合作获得LENS技术商业许可,并推出包括LENS 860-R、LENS 1500等设备。LENS 860-R是一款拥有900mm \times 1500mm \times 900mm加工尺寸的中大型零件增减材一体设备,搭载标准五轴数控机床,16个用于机加工的ATC工具,线性分辨率 ± 0.025 mm。2016年成立的美国Formally公司推出采用LMD技术的A、L及X系列3D打印机,其中

X-Series拥有可变波长激光器(红外970~1070nm、蓝色450nm)、Formax沉积头及Formfeed高精度送粉器等新技术,粉末利用率达95%,最高沉积率可达7kg/h。美国Additec与西班牙Sicnova合资的Meltio公司研发的桌面级3D打印机M450,采用LMD-WP专利技术,可用于打印45~90mm的金属粉末及0.8~1.2mm的线材。此外,美国DM3D、美国EFESTO、美国RPM Innovations、德国Trumpf、德国DMG Mori、德国Siemens、法国BeAM、日本MHI、日本Toshiba、日本Mazak、韩国InssTek等国外公司都有相关设备推出。

国内方面,南京中科煜宸激光技术有限公司研发了RC-LDM8060、RC-LDM4000等送粉式金属增材制造设备,其中RC-LDM8060的成形尺寸为800mm \times 600mm \times 900mm,最大打印速度为5m/min,采用自研的RC系列沉积头,适用于高精度,大尺寸零部件的激光直接沉积制造及受损零部件直接修复等。西安铂力特基于LSF技术开发出的BLT-C1000金属增材制造高效成形设备,成形尺寸为

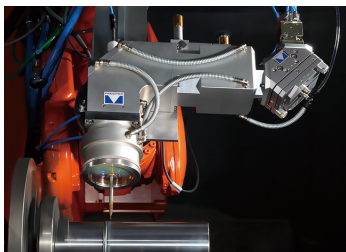
1500mm \times 1000mm \times 1000mm,主要应用于航空、航天、汽车等领域的大尺寸零部件的制造及修复。此外,北京鑫精合、江苏永年、北京隆源、北京煜鼎等国内设备制造商都在进行LMD技术开发及设备制造。表3列出了基于LMD技术的主要设备制造商及设备型号、成形尺寸等参数。

未来发展趋势

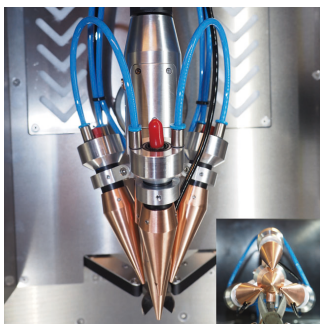
LMD技术在成形效率和成形精度、工艺稳定性及性能一致性等方面还有许多不足之处。未来,LMD技术的发展将以新材料、新工艺及新设备为主要内容,并集中在以下5个方向:

(1)材料体系集约化。针对增材制造的特点,研发适用于不同性能需求的新型合金材料;对具有相同性能的材料进行整合,降低材料制造成本;集中建立并优化材料工艺参数体系库。

(2)工艺参数系统化。分析不同工艺参数之间的内在联系,研究工艺参数对成形质量影响的一般规律;利用辅助工艺的优点,优化传统工艺参数的不足,将传统工艺参数与辅助工艺参数系统地结合起来。



(a) CoaxPrinter 沉积头



(b) μ Printer 沉积头

图4 金属沉积头

Fig.4 Metal deposition head

表3 基于LMD技术的典型增材制造设备

Table 3 Additive manufacturing equipment based on LMD technology

厂商	设备型号	成形尺寸/mm	激光功率/W	材料特性
美国 Optomec	LENS 860-R	900 \times 1500 \times 900	4000	粉末
美国 Formally	X-Series	1000 \times 1000 \times 1000	8000	粉末
德国 DMG Mori	LASERTEC 125 3D	1250 \times 1250 \times 745	3000	粉末
德国 Trumpf	TruLaser Cell 7040	4000 \times 2000 \times 750	6000	粉末
法国 BeAM	Magic 800	1200 \times 800 \times 800	4000	粉末
韩国 InssTek	MX-Mini	200 \times 200 \times 200	3000	粉末
南京中科煜宸	RC-LDM8060	800 \times 600 \times 900	10000	粉末
北京鑫精合	TSC-S4510	4500 \times 4500 \times 1500	10000	粉末
西安铂力特	BLT-C1000	1500 \times 1000 \times 1000	6000	粉末
北京隆源	AFS-D800	900 \times 900 \times 700	6000	粉末
美国 Additec	μ Printer	160 \times 120 \times 450	1000	粉末/丝材
西班牙 Meltio	M 450	150 \times 200 \times 450	1500	粉末/丝材

(3) 成形过程高效化。开发可靠的沉积头及送粉/送丝设备;建立精确模型,提高切片精度,通过计算机模拟减少试验试错;提高在线监测与闭环控制灵敏度;对零件进行整体设计,结合拓扑优化,减少耗材使用。

(4) 设备集成智能化。未来设备的研发将趋向增减材复合、多能场复合等新技术,并集中在一体化设备、自动化系统、智能化控制等方面。

(5) 应用领域广泛化。随着技术创新及新设备的研发,行业需求不断扩大,LMD技术的应用领域将越来越广泛和深入。

结论

LMD技术由于其独特的技术优势,在航空航天、石油勘探、采矿、汽车模具等领域得到了越来越多的应用,但LMD技术的一些缺点同样制约了其未来的发展。随着研究的不断深入,基于LMD技术的增减材复合、多能场复合等复合制造技术逐渐成为研究的热点,这对LMD技术的工艺及设备提出了更高的要求。

一方面,复合增材制造技术涉及不同工艺技术之间的相互协同与制约,这要求将LMD技术的工艺参数与辅助技术的工艺参数进行总体分析和优化,这是基于LMD技术的复合增材制造技术未来需要解决的问题;另一方面,对于复合增材制造设备集成自动化,系统控制智能化等的研究,也是未来发展的一个重要内容。

参考文献

[1] FRAZIER W E. Metal additive manufacturing: A review[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2014, 23(6): 1917-1928.

[2] ASTM. F3187-16 standard guide for directed energy deposition of metals[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2016.

[3] MEHTA P P, OTTEN R R, COOPER E B. Method and apparatus for repairing metal in an article: US4743733[P]. 1988-05-10.

[4] GRIFFITH M L, KEICHER D L, ROMERO J A, et al. Laser engineered net shaping (LENS) for the fabrication of metallic components: CONF-9605172-1[R]. Albuquerque: Sandia National Labs., 1996.

[5] LEWIS G K, SCHLIENGER E. Practical considerations and capabilities for laser assisted direct metal deposition[J]. *Materials & Design*, 2000, 21(4): 417-423.

[6] MAZUMDER J, DUTTA D, KIKUCHI N, et al. Closed loop direct metal deposition: Art to part[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2000, 34(4): 397-414.

[7] MERZ R, PRINZ F B, RAMASWAMI K, et al. Shape deposition manufacturing[C]// 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 1994.

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

[9] MCLEAN M A. Laser direct casting of high nickel alloy parts[J]. *Metal Powder Report*, 1998, 53(9): 57.

[10] KLOCKE F, FREYER C. Fast manufacture, modification and repair of molds using controlled metal build up (CMB)[J]. *RAPTIA Newsletter*, 2001(6): 6-8.

[11] GREMAUD M, WAGNIERE I D, ZRYD A, et al. Laser metal forming: Process fundamentals[J]. *Surface Engineering*, 1996, 12(3): 251-259.

[12] 黄卫东, 李延民, 冯莉萍, 等. 金属材料激光立体成形技术[J]. *材料工程*, 2002, 30(3): 40-43, 27.

HUANG Weidong, LI Yanmin, FENG Liping, et al. Laser solid forming of metal powder materials[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2002, 30(3): 40-43, 27.

[13] NGO T, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges[J]. *Composites Part B-engineering*, 2018, 143: 172-196.

[14] 张安峰, 李涤尘, 梁少端, 等. 高性能金属零件激光增材制造技术研究进展[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(22): 16-22.

ZHANG Anfeng, LI Dichen, LIANG Shaoduan, et al. Development of laser additive manufacturing of high-performance metal parts[J]. *Aeronautical Manufacturing*

Technology, 2016, 59(22): 16-22.

[15] KEICHER D M, SMUGERESKY J E, ROMERO J A, et al. Using the laser engineered net shaping (LENS) process to produce complex components from a CAD solid model[C]//Lasers as Tools for Manufacturing II. International Society for Optics and Photonics, 1997.

[16] GRIFFITH M L, SCHLIENGER M, HARWELL L D, et al. Understanding thermal behavior in the lens process[J]. *Materials & Design*, 1999, 20(2): 107-113.

[17] GRAF B, MARKO A, PETRAT T, et al. 3D laser metal deposition: Process steps for additive manufacturing[J]. *Welding in the World*, 2018, 62(4): 877-883.

[18] PETRAT T, BRUNNER-SCHWER C, GRAF B, et al. Microstructure of Inconel 718 parts with constant mass energy input manufactured with direct energy deposition[J]. *Procedia Manufacturing*, 2019, 36: 256-266.

[19] DALAEI M T, GLOOR L, LEINENBACH C, et al. Experimental and numerical study of the influence of induction heating process on build rates Induction Heating-assisted laser Direct Metal Deposition (IH-DMD)[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2020, 384: 125275.

[20] SHI T, LU B H, SHI S H, et al. Laser metal deposition with spatial variable orientation based on hollow-laser beam with internal powder feeding technology[J]. *Optics and Laser Technology*, 2017, 88: 234-241.

[21] 张安峰, 张金智, 张晓星, 等. 激光增材制造高性能钛合金的组织调控与各向异性研究进展[J]. *精密成形工程*, 2019, 11(4): 1-8.

ZHANG Anfeng, ZHANG Jinzhi, ZHANG Xiaoxing, et al. Research progress in tissue regulation and anisotropy of high-performance titanium alloy by laser additive manufacturing[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(4): 1-8.

[22] YANG J X, XIAO Z Y, YANG F, et al. Microstructure and magnetic properties of NiCrMoAl/WC coatings by laser cladding: Effect of WC metallurgical behaviors[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2018, 350: 110-118.

[23] YANG J X, MIAO X H, WANG X B, et al. Microstructure, magnetic properties and empirical electron theory calculations of laser cladding FeNiCr/60%WC composite coatings with Mo additions[J]. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 2016, 54: 216-222.

- [24] YANG J X, XIAO Z Y, MIAO X H, et al. The effect of Ti additions on the microstructure and magnetic properties of laser clad FeNiCr/60%WC coatings[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2015, 52: 6–11.
- [25] YANG J X, MIAO X H, WANG X B, et al. Influence of Mn additions on the microstructure and magnetic properties of FeNiCr/60% WC composite coating produced by laser cladding[J]. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 2014, 46: 58–64.
- [26] 杨胶溪, 常万庆, 缪宣和, 等. 添加 Mn、Mo、Ti 合金元素对激光熔覆 WC-FeNiCr 复合涂层组织及磁性能的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(10): 180–185.
- YANG Jiaoxi, CHANG Wanqing, MIAO Xuanhe, et al. Influence of Mn, Mo, Ti additions on microstructure and magnetic properties of WC-FeNiCr composite coatings[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(10): 180–185.
- [27] 徐滨士, 董世运, 门平, 等. 激光增材制造成形合金钢件质量特征及其检测评价技术现状(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 8–16.
- XU Binshi, DONG Shiyun, MEN Ping, et al. Quality characteristics and nondestructive test and evaluation technology for laser additive manufacturing alloy steel components(invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4): 8–16.
- [28] 胡婷婷, 高丽敏, 杨海楠. 航空航天用增材制造金属结构件的无损检测研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(8): 70–75, 87.
- HU Tingting, GAO Limin, YANG Hainan. Application of nondestructive testing techniques on additive manufacturing in aerospace fields[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(8): 70–75, 87.
- [29] YANG N, YEE J, ZHENG B, et al. Process-structure-property relationships for 316L stainless steel fabricated by additive manufacturing and its implication for component engineering[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26(4): 610–626.
- [30] ZHENG B, HALEY J C, YANG N, et al. On the evolution of microstructure and defect control in 316L SS components fabricated via directed energy deposition[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 764: 138243.
- [31] BARR C, SUN S D, EASTON M, et al. Influence of delay strategies and residual heat on in situ tempering in the laser metal deposition of 300M high strength steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 383: 125279.
- [32] 宋衍, 喻凯, 林鑫, 等. 热处理态激光立体成形 Inconel 718 高温合金的组织及力学性能[J]. 金属学报, 2015, 51(8): 935–942.
- SONG Kan, YU Kai, LIN Xin, et al. Microstructure and mechanical properties of heat treatment laser solid forming superalloy inconel 718[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(8): 935–942.
- [33] ZHAO Z, CHEN J, TAN H, et al. Microstructure and mechanical properties of laser repaired TC4 titanium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(7): 1792–1797.
- [34] 杨海欧, 韩加军, 林鑫, 等. 热处理对激光立体成形 DZ125 高温合金组织的影响[J]. 中国激光, 2018, 45(11): 52–60.
- YANG Hai'ou, HAN Jiajun, LIN Xin, et al. Effect of heat treatment on microstructure of laser solid formed DZ125 superalloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 52–60.
- [35] 杨海欧, 王猛, 魏雷, 等. 多路粉末送进激光立体成形钨合金组织凝固形态分析[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3): 161–167.
- YANG Hai'ou, WANG Meng, WEI Lei, et al. Solidification morphology analysis of tungsten alloy by laser solid forming with multi-channel powder feeding[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(3): 161–167.
- [36] 丁莹, 杨海欧, 白静, 等. 激光立体成形 AlSi10Mg 合金的微观组织及力学性能[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4): 46–54.
- DING Ying, YANG Hai'ou, BAI Jing, et al. Microstructure and mechanical property of AlSi10Mg alloy prepared by laser solid forming[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(4): 46–54.
- [37] 杨海欧, 赵宇凡, 许建军, 等. 激光立体成形 Rene88DT 镍基高温合金沉积态组织研究[J]. 精密成形工程, 2019, 11(4): 9–14.
- YANG Hai'ou, ZHAO Yufan, XU Jianjun, et al. AS-deposited microstructures of Rene88DT nickel-base superalloy by laser solid forming[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(4): 9–14.
- [38] 汤海波, 吴宇, 张述泉, 等. 高性能大型金属构件激光增材制造技术研究现状与发展趋势[J]. 精密成形工程, 2019, 11(4): 58–63.
- TANG Haibo, WU Yu, ZHANG Shuquan, et al. Research status and development trend of high performance large metallic components by laser additive manufacturing technique[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(4): 58–63.
- [39] 王华明, 张述泉, 王韬, 等. 激光增材制造高性能大型钛合金构件凝固晶粒形态及显微组织控制研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 9–14.
- WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Tao, et al. Progress on solidification grain morphology and microstructure control of laser additively manufactured large titanium components[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2018, 37(4): 9–14.
- [40] 董世运, 门平. 激光增材制造合金钢力学性能超声纵波定量无损评价[J]. 精密成形工程, 2019, 11(4): 29–36.
- DONG Shiyun, MEN Ping. Nondestructive quantitative evaluation on mechanical property of alloy steel by laser additive manufacturing via ultrasonic longitudinal wave[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2019, 11(4): 29–36.
- [41] 赵吉宾, 刘伟军. 快速成型技术中分层算法的研究与进展[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(2): 209–221.
- ZHAO Jibin, LIU Weijun. Recent progress in slicing algorithm of rapid prototyping technology[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(2): 209–221.
- [42] ZHAO G, MA G C, FENG J W, et al. Nonplanar slicing and path generation methods for robotic additive manufacturing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(9): 3149–3159.
- [43] 金宇鹏. 机器人增材制造曲面分层与中轴路径规划算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- JIN Yupeng. Surface layering and central axis path planning algorithm for robotic additive manufacturing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [44] 田仁强, 刘少岗, 张义飞. 增材制造中 STL 模型三角面片法向量自适应分层算法研究[J]. 机械科学与技术, 2019, 38(3): 415–421.
- TIAN Renqiang, LIU Shaogang, ZHANG Yifei. Research on adaptive layering algorithm of triangular facet normal vector of STL model in additive manufacturing[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(3): 415–421.
- [45] 魏雷, 林鑫, 王猛, 等. 金属激光增材制造过程数值模拟[J]. 航空制造技术, 2017, 60(13): 16–25.
- WEI Lei, LIN Xin, WANG Meng, et al. Numerical simulation on laser additive manufacturing process for metal components[J].

Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(13): 16–25.

[46] JOHNSON K L, RODGERS T M, UNDERWOOD O D, et al. Simulation and experimental comparison of the thermo-mechanical history and 3D microstructure evolution of 304L stainless steel tubes manufactured using LENS[J]. Computational Mechanics, 2018, 61(5): 559–574.

[47] WALKER T R, BENNETT C J, LEE T L, et al. A novel numerical method to predict the transient track geometry and thermomechanical effects through in situ modification of the process parameters in direct energy deposition[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2020, 169: 103347.

[48] 张吉平, 石世宏, 蒋伟伟, 等. 三光束光内送丝激光熔覆温度场仿真分析与工艺优化[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 122–129.

ZHANG Jiping, SHI Shihong, JIANG Weiwei, et al. Simulation analysis of

temperature field and process optimization of laser cladding based on internal wire feeding of three beams[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 122–129.

[49] ZAVALOV Y N, DUBROV A V, RODIN P S, et al. Temperature distribution of gas powder jet formed by coaxial nozzle in laser metal deposition[C]//3D Printed Optics and Additive Photonic Manufacturing. Strasbourg: International Society for Optics and Photonics, 2018.

[50] ZAVALOV Y N, DUBROV A V, DUBROV V D. Optical method of on-line temperature monitoring on the melt surface in laser metal deposition technology[C]//Optical Measurement Systems for Industrial Inspection XI. Munich: International Society for Optics and Photonics, 2019.

[51] TAKUSHIMA S, MORITA D, SHINOHARA N, et al. Optical in-process height measurement system for process control

of laser metal-wire deposition[J]. Precision Engineering, 2020, 62: 23–29.

[52] 张荣华, 宋立军. 激光增材制造熔池温度实时监测与控制[J]. 应用激光, 2018, 38(1): 13–18.

ZHANG Ronghua, SONG Lijun. Real-time monitoring and control of melt pool temperature during laser additive manufacturing[J]. Applied Laser, 2018, 38(1): 13–18.

[53] ARCELLA F G, FROES F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming[J]. Journal of Metals, 2000, 52(5): 28–30.

[54] SCOTT C. GKN launches into aerospace 3D printing[EB/OL]. [2017–07–12]. <https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPri ntingArticles/ArticleID/15218/GKN-Launches-into-Aerospace-3D-Printing.aspx>.

通讯作者: 杨胶溪, E-mail: yangjiaoxi@bjut.edu.cn.

Research and Application Progress of Laser Metal Deposition

YANG Jiaoxi¹, KE Hua¹, CUI Zhe¹, LIU Qi^{2,3,4,5}, LI Huaixue^{2,3,4,5}, ZHOU Zheng⁶,
XIAO Junheng⁶, ZHANG Zhiyong⁷

(1. Institute of Laser Engineering, Faculty of Material and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 100024, China;

3. Beijing Key Laboratory of High Power Beam Additive Manufacturing Technology and Equipment, Beijing 100024, China;

4. Science and Technology on Power Beam Processes Laboratory, Beijing 100024, China;

5. Aeronautical Key Laboratory for Additive Manufacturing Technologies, Beijing 100024, China;

6. State Key Laboratory for Track Technology of High-Speed Railway, Beijing 100081, China;

7. Teye (Beijing) Technology Development Co., Ltd., Beijing 100043, China)

[ABSTRACT] Additive manufacturing is an advanced manufacturing technology that combines materials science, mechanical automation and information technology. It has played an increasingly important role in the past 30 years of development. Laser metal deposition (LMD) is an additive manufacturing technology based on directed energy deposition (DED), which has received widespread attention in recent years. The basic operation principle and system composition of LMD technology were described. The research progress and application status of LMD technology at home and abroad were mainly introduced. Some LMD-based technology development and equipment manufacturing were listed. The shortcomings of LMD technology in forming efficiency, forming precision, process stability and performance consistency were pointed out. Finally, Five development trends of LMD technology were summarized: Intensification of material system; Systematic analysis of technological parameters; Improve forming efficiency; Intelligent integrated device control, Expansion of application areas.

Keywords: Additive manufacturing (AM); Directed energy deposition (DED); Laser metal deposition (LMD);

Rapid prototyping (RP)

(责编 阳光)