

激光增材制造技术的研究现状及发展趋势*

杨 强¹, 鲁中良^{1,2}, 黄福享¹, 李涤尘¹

(1. 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049;

2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

[摘要] 增材制造技术能够快速将复杂结构的三维数据模型直接转化为实体零部件,是一种快速发展的数字化制造技术。激光增材制造技术是增材制造技术中最具代表性的一类,在增材制造技术领域扮演着重要的角色。主要介绍了两种典型的激光增材制造技术:激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术和激光金属直接成形(Laser Metal Direct Forming, LMDF)技术的原理与特点,归纳了其发展和研究现状,指出了激光增材制造技术的发展趋势。

关键词: 激光增材制造; 激光选区熔化; 激光金属直接成形; 复杂零件

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2016.12.026



杨 强

西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室博士研究生,研究方向为先进制造技术与3D打印。

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术是基于分层制造原理,采用材料逐层累加的方法,直接

* 基金项目: 国家重大专项“燃气轮机定向凝固叶片氧化铝型壳型芯制备技术及关键设备”(2012ZX04007-021)。

将数字化模型制造为实体零件的一种新型制造技术。美国材料与试验协会(ASTM)F42 国际委员会给出了增材制造的定义: 增材制造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^[1]。增材制造技术集成了数字化技术、制造技术、激光技术以及新材料技术等多个学科技术,可以直接将 CAD 数字模型快速而精密地制造成三维实体零件,实现真正的“自由制造”。与传统制造技术相比,增材制造技术具有柔性高、无模具、周期短、不受零件结构和材料限制等一系列优点,在航空航天、汽车、电子、医疗、军工等领域得到了广泛应用^[2-5]。增材制造技术已成为制造业的研究热点,许多国家包括中国都对其展开了大量深入的研究,欧美更有专家认为这项技术代表着制造业发展的新趋势,被誉为有望成为“第三次工业革命”的代表性技术^[6-8]。

激光增材制造(Laser Additive Manufacturing, LAM)技术是一种以激光为能量源的增材制造技术,激光具有能量密度高的特点,可实现难加工金属的制造,比如航空航天领域采用的钛合金、高温合金等,同时激光增材制造技术还具有不受零件结构限制的优点,可用于结构复杂、难加工以及薄壁零件的加工制造。目前,激光增材制造技术所应用的材料已涵盖钛合金、高温合金、铁基合金、铝合金、难熔合金、非晶合金、陶瓷以及梯度材料等^[9],在航空航天领域中高性能复杂构件和生物制造领域中多孔复杂结构制造具有显著优势^[10]。

激光增材制造技术按照其成形原理进行分类,最具代表性的为以粉床铺粉为技术特征的激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)和以同步送粉为技术特征的激光金属直接成形(Laser Metal Direct Forming, LMDF)技术。本文在阐述了这两种典型的激光增材制造技术原理与特

点的基础上,着重归纳了这两种技术的发展和研究现状,并探讨了目前激光增材制造技术的发展趋势。

激光选区熔化技术的研究现状

1 SLM 技术的原理和特点

激光选区熔化(Selective Laser Melting, SLM)技术是利用高能量的激光束,按照预定的扫描路径,扫描预先铺覆好的金属粉末将其完全熔化,再经冷却凝固后成形的一种技术。其技术原理如图 1 所示。

SLM 技术具有以下几个特点:

- (1) 成形原料一般为一种金属粉末,主要包括不锈钢、镍基高温合金、钛合金、钴-铬合金、高强铝合金以及贵金属等。
- (2) 采用细微聚焦光斑的激光束成形金属零件,成形的零件精度较高,表面稍经打磨、喷砂等简单处理后即可达到使用精度要求。
- (3) 成形零件的力学性能良好,一般拉伸性能可超铸件,达到锻件水平。
- (4) 进给速度较慢,导致成形效率较低,零件尺寸会受到铺粉工作箱的限制,不适合制造大型的整体零件。

2 SLM 技术的发展现状

SLM 技术实际上是在选区激光烧结(Selective Laser Sintering, SLS)技术基础上发展起来的一种激光增材制造技术。SLS 技术最早由德克萨斯大学奥斯汀分校(University of

Texas at Austin)的 Deckard 教授^[11]提出,但是在 SLS 成形过程中存在粉末连接强度较低的问题,为了解决这一问题,1995 年德国弗劳恩霍夫(Fraunhofer)激光技术研究所的 Meiners^[12]提出了基于金属粉末熔凝的选区激光熔化技术构思,并且在 1999 年与德国的 Fockle 和 Schwarze 一起研发了第一台基于不锈钢粉末的 SLM 成形设备,随后许多国家的研究人员都对 SLM 技术展开了大量的研究。

目前,对 SLM 技术的研究主要集中在德国、美国、日本等国家,主要是针对 SLM 设备的制造和成形工艺两方面展开。国外有许多专业生产 SLM 设备公司,如美国的 PHENIX、3D SYSTEM 公司;德国的 EOS、CONCEPT、SLM SOLUTIONS 公司;日本的 MATSUUR、SODICK 公司等,均生产有性能优越的 SLM 设备,目前德国 EOS 公司生产的 EOS M400 型 SLM 设备最大加工体积可达 400mm×400mm×400mm。在中国对 SLM 设备的研究主要集中在高校,华中科技大学、西北工业大学和华南理工大学等高校在 SLM 设备生产研发方面做了大量的研究工作,并且成功应用,其中华中科技大学史玉升团队以大尺寸激光选区烧结设备研究与应用获得 2011 年国家技术发

明二等奖。但是国内成熟的商业化设备依旧存在空白,目前国内使用的 SLM 设备主要还是以国外的产品为主,这将是今后中国 SLM 技术发展的一个重点方向。

在 SLM 成形工艺方面,大量的研究机构都对此进行了深入研究。白俄罗斯科学院的 Tolcochko^[13]研究了在选区激光熔化时金属粉末球化形成的具体过程,指出金属粉末的球化主要会形成碟形、杯形、球形 3 种典型的形状,并分析了各自形成的机理。德国鲁尔大学的 Meier^[14]研究了不锈钢粉末在激光选区熔化成形的相对密度与工艺参数的关系,发现高的激光功率有利于成形出高密度的金属零件,低的扫描速度有利于扫描线的连续,促进致密化。英国利兹大学 Badrossamay 等^[15]对不锈钢和工具钢合金粉末进行了 SLM 研究,分析了扫描速率、激光功率和扫描间隔对成形件质量的影响。华中科技大学 Shi 等^[16]对 SLM 成形过程中熔池边界对成形件性能的影响进行了深入的研究,研究表明熔池边界对成形件的力学性能尤其是延展性与韧性有很大的影响。华南理工大学杨永强等^[17]对 SLM 成形金属零件上表面的粗糙度影响因素进行了研究,发现成形件上的表面粗糙度主要受熔道宽度、扫描间距和铺粉层厚 3 个因素的共同影响,并提出利用电化学处理提高表面精度的方法。

近年来 SLM 技术发展受到了许多国家的大力扶持,2012 年美国国防部成立了国家选区熔化成形创新联盟(NAMII),国防部、能源部、商务部、国家自然科学基金(NSF)以及国防航空航天局(NASA)共同承诺向激光选区熔化成形试点联盟投资 4500 万美元,创新联盟共包括 40 家企业、9 个研究型大学、5 个社区学院以及 11 个非营利机构^[18]。众所周知的美国 Boeing 公司、Lockheed Martin 公司、GE 航空发动机公司、Sandia 国

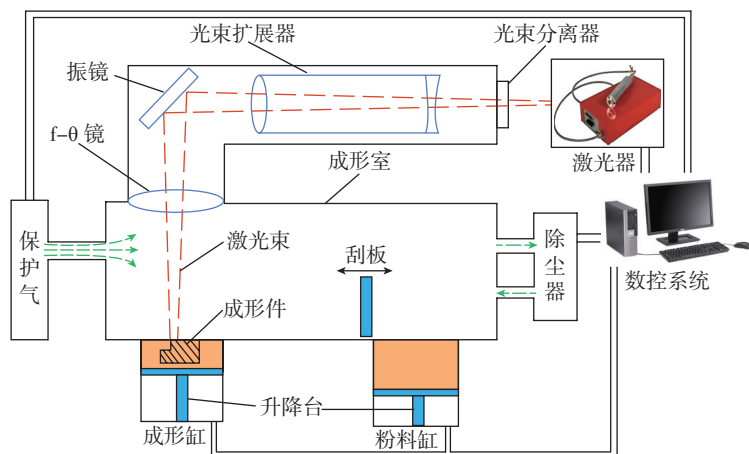


图1 激光选区熔化技术原理图
Fig.1 Schematic diagram of SLM

家实验室和 Los Alamos 国家实验室均参与其中。此外,意大利 AVIO 公司、加拿大国家研究院、澳大利亚国家科学研究中心等大型公司、国家研究机构以及我国的华中科技大学、华南理工大学等高校也都对 SLM 技术开展了大量研究工作。

美国的 GE 公司于 2012 年收购了 Morris Technologies 公司,并且利用 Morris 的 SLM 设备与工艺技术制造出了喷气式飞机专用的发动机组件,如图 2 (a)、(b) 所示,GE 公司明确地将激光增材制造技术认定为推动未来航空发动机发展的关键技术。同时 SLM 技术在医学领域也有重要的应用,西班牙的 Salamanca 大学利用澳大利亚科学协会研制的 Arcam 型 SLM 设备成功制造出了钛合金胸骨与肋骨,如图 2 (c) 所示,并成功植入了罹患胸廓癌的患者体内。西北工业大学、华中科技大学和 华南理工大学是我国从事 SLM 技术研究较早较深入的科研单位,在 SLM 技术的研究中取得了许多可喜的成果,他们分别应用 SLM 技术制造出了大量的具有复杂结构的金属零件,如图 2 (d)~(f) 所示。

激光金属直接成形技术的研究现状

1 LMDF 技术的原理与特点

激光金属直接成形(Laser Metal Direct Forming, LMDF)技术是利用快速原型制造的基本原理,以金属粉末为原材料,采用高能量的激光作为能量源,按照预定的加工路径,将同步送给的金属粉末进行逐层熔化,快速凝固和逐层沉积,从而实现金属零件的直接制造。通常情况下,激光金属直接成形系统平台包括:激光器、CNC 数控工作台、同轴送粉喷嘴、高精度可调送粉器及其他辅助装置。其原理如图 3 所示^[19]。

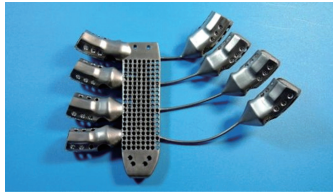
激光金属直接成形技术集成了激光熔覆技术和快速成形技术的优



(a) 美国 GE 选区激光熔化的航空发动机叶轮



(b) 美国 GE 选区激光熔化的燃料喷嘴



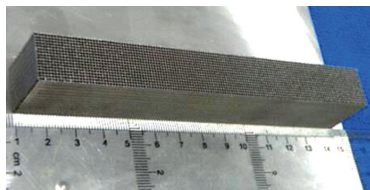
(c) 西班牙 Salamanca 大学的钛合金胸骨与肋骨



(d) 西北工业大学的复杂结构零件



(e) 华中科技大学的蜂窝多孔金属零件



(f) 华中科技大学不锈钢复杂空间多孔零件

图2 SLM技术应用实例
Fig.2 Application of SLM

点,具有以下特点:(1)无需模具,可实现复杂结构的制造,但悬臂结构需要添加相应的支撑结构。(2)成形尺寸不受限制,可实现大尺寸零件的

制造。(3)可实现不同材料的混合加工与制造梯度材料。(4)可对损伤零件实现快速修复。(5)成形组织均匀,具有良好的力学性能,可实现定向组织的制造。

2 LMDF 技术的发展现状

LMDF 技术是在快速原型技术的基础上结合同步送粉和激光熔覆技术发展起来的一项激光增材制造技术。LMDF 技术起源于美国 Sandai 国家实验室的激光近净成形技术(Laser Engineered Net Shaping, LENS)^[20],随后在多个国际研究机构快速发展起来,并且被赋予了很多人不同的名称,如美国 Los Alamos 国家实验室的直接激光制造(Direct Laser Fabrication, DLF)^[21],斯坦福大学的形状沉积制造(Shape Deposition Manufacturing, SDM)^[22],密西根大学的直接金属沉积(Direct Metal Deposition, DMD)^[23],德国弗劳恩霍夫(Fraunhofer)激光技术研究所的激光金属沉积(Laser Metal Deposition, LMD)^[24],中国西北工业大学的激光立体成形技术(Laser Solid Forming, LSF)^[25]等,虽然名称各不相同,但是技术原理却几乎是一致的,都是基于同步送粉和激光熔覆技术。

目前,对于 LMDF 技术的研究主要是针对成形工艺以及成形组织性能两方面展开,美国的 Sandai 国家实验室和 Los Alamos 国家实验室针对镍基高温合金、不锈钢、钛合金等金属材料进行了大量的激光金属直接成形研究,所制造的金属零件不仅形状复杂,且其力学性能接近甚至超过传统锻造技术制造的零件^[26]。瑞士洛桑理工学院的 Kurz 等^[27]深入研究了激光快速成形工艺参数对成形过程稳定性,成形零件的精度控制,材料的显微组织以及性能的影响,并将该技术应用于单晶叶片的修复。清华大学的钟敏霖和宁国庆等^[28]在激光快速成形同轴送粉系统的研制及熔覆高度检测及控制方面取得了

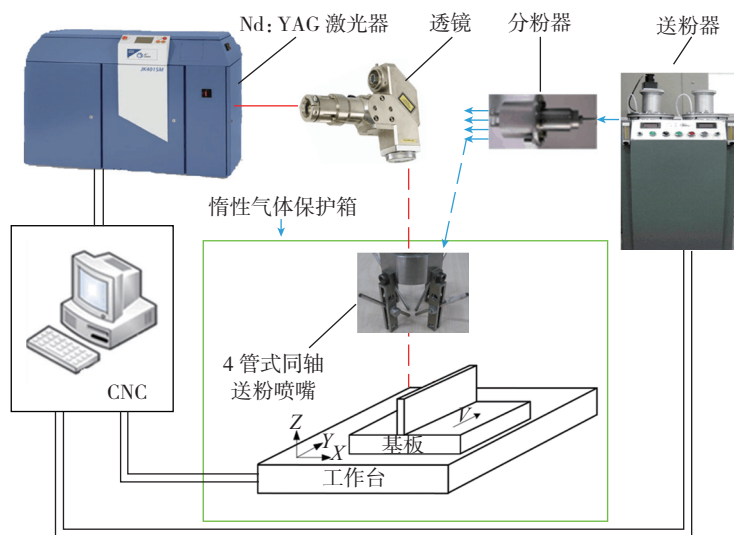


图3 LMDF系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of LMDF

研究进展;西北工业大学的黄卫东等^[29]通过对单层涂覆厚度、单道涂覆宽度、搭接率等主要参数进行精确控制,获得件内部致密,表面质量良好的成形件;西安交通大学的张安峰、李涤尘等^[19]研究了激光金属直接成形 DZ125L 高温合金零件过程中不同工艺参数(如激光功率、扫描速度、送粉率、Z轴提升量等)对单道熔覆层高度、宽度、宽高比和成形质量的影响规律,并优化了工艺参数。

近年来,LMDF 技术同样也受到了许多国家的重视和大力发展,2013 年欧洲空间局(ESA)提出了“以实现高技术金属产品的高效生产与零浪费为目标的增材制造项目”(AMAZE)计划,该计划于 2013 年 1 月正式启动,汇集了法国 Airbus 公司、欧洲宇航防务集团(EADS)的 Astrium 公司、英国 Rolls·Royce 公司以及英国的 Cranfield University 和 University of Birmingham 等 28 家机构来共同从事激光金属增材制造方面的研究,旨在将增材制造带入金属时代,其首要目标是快速生产大型零缺陷增材制造金属零件,几乎实现零浪费。与此同时,美国的 Sandai 国家实验室、Los Alamos 国家实验室、GE 公司以及美国国防航空

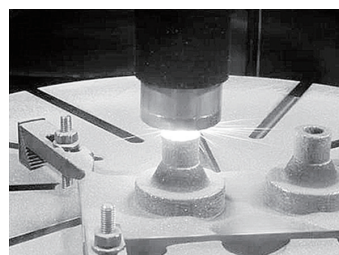
航天局(NASA),德国的弗劳恩霍夫(Fraunhofer)激光技术研究所,我国的北京航空航天大学、西安交通大学、西北工业大学等也对 LMDF 展开深入的研究。

美国国防航空航天局(NASA)喷气推进实验室开发出一种新的激光金属直接成形技术,可在一个部件上混合打印多种金属或合金,解决了长期以来飞行器尤其是航天器零部件制造中所面临的一大难题——在同一零件的不同部位具有不同性能,如图 4(a)所示。英国的罗·罗(Rolls·Royce)公司计划利用激光金属直接成形技术,来生产 Trent XWB-97(罗·罗研发的涡轮风扇系列发动机)由钛和铝的合金构成的前轴承座,其前轴承座包括 48 片机翼叶,直径为 1.5m,长度为 0.5m,如图 4(b)所示。北京航空航天大学的王华明团队也利用激光金属直接成形技术制造出了大型飞机钛合金主承力构件加强框,如图 4(c)所示,并获得了国家技术发明一等奖。西安交通大学在国家“973 项目”的资助下,展开了利用激光金属直接成形技术制造空心涡轮叶片方面的研究,并成功制备出了具有复杂结构的空心涡轮叶片,如图 4(d)所示。

激光增材制造技术的发展趋势

1 设备方面

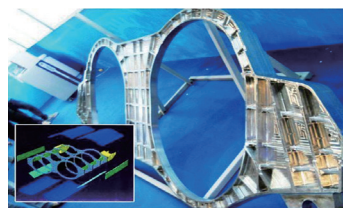
经济、高效的设备是激光增材制造技术广泛推广和发展的基础^[30],随着目前大功率激光器的使用以及送粉效率的不断提高,激光增材制造的加工效率已经有显著的提高,但是对于大尺寸零件的制造效率依然偏低,而且激光增材制造设备的价格也偏高,因此进一步提高设备的加工效



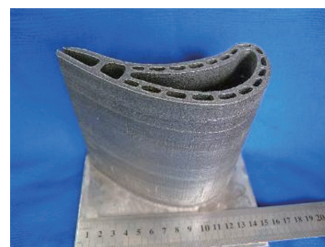
(a) 美国 NASA 多种金属混合激光成形



(b) 英国 Rolls·Royce 激光金属直接成形引擎部件



(c) 北京航空航天大学飞机钛合金主承力构件加强框



(d) 西安交通大学高温合金空心涡轮叶片

图4 LMDF技术应用实例

Fig.4 Application of LMDF

率同时降低设备的成本有着重要的意义。此外,激光增材制造设备还可以与传统加工复合,例如德国 DMG MORI 旗下的 Lasertec 系列,整合了激光增材制造技术与传统切削技术,不仅可以制造出传统工艺难以加工的复杂形状,还改善了激光金属增材制造过程中存在的表面粗糙问题,提高了零件的精度。

2 材料方面

对于金属材料激光增材制造技术来说,金属粉末就是其原材料,金属粉末的质量会直接影响到成形零部件最终的质量。然而,目前还没有专门为激光增材制造生产的金属粉末,现在激光增材制造工艺所使用的金属粉末都是之前为等离子喷涂、真空等离子喷涂和高速氧燃料火焰喷涂等热喷涂工艺开发的,基本都是使用雾化工艺制造^[31]。这类金属粉末在生产过程中可能会形成一些空心颗粒,将这些空心颗粒的金属粉末用于激光增材制造时,会导致在零件中出现孔洞、裂纹等缺陷。在 2015 年 3 月美国奥兰多举办的第七届激光增材制造研讨会上,激光增材制造用的金属粉末成为本次会议的焦点议题,受到了与会专家、学者的高度重视^[32],因此激光增材制造使用的金属粉末将成为今后的一个研究重点。

3 工艺方面

虽然目前对激光增材制造的工艺展开了大量研究,但是在零件的成形过程中依然存在许多问题。在 SLM 成形过程中伴随着复杂的物理、化学、冶金等过程,容易产生球化、孔隙、裂纹等缺陷^[33],在 LMDF 成形过程中随着高能激光束长时间周期性剧烈加热和冷却、移动熔池在池底强约束下的快速凝固收缩及其伴生的短时非平衡循环固态相变,会在零件内部产生极大的内应力,容易导致零件严重变形开裂^[34]。进一步优化激光增材制造技术的工艺,克服成形过程中的缺陷,加强对激光增材制造过

程中零件内应力演化规律、变形开裂行为及凝固组织形成规律以及内部缺陷形成机理等关键基础问题的研究^[35],依然是今后的研究重点。

结束语

我国的激光增材制造技术起步较早,已经取得了不少研究成果,但是仍然与国外存在一定的差距,应当进一步加大投入力度,加快研究进展。激光增材制造技术作为一种新兴的技术,在今后的发展中应该更注重“产、学、研”一体化发展,以市场需求为导向,制定出一系列工艺规范与标准,并逐步解决关键的工艺问题,降低成本,使激光增材制造技术早日成为我国产业转型的一个重要工具。

参考文献

- [1] 李涤尘, 田小永, 王永信, 等. 增材制造技术的发展[J]. 电加工与模具, 2012(A01):20-22.
- [2] LI Dichen, TIAN Xiaoyong, WANG Yongxin, et al. Developments of additive manufacturing technology[J]. Electromachining & Mould, 2012(A01):20-22.
- [3] MELCHELS F P W, DOMINGOS M A N, KLEIN T J, et al. Additive manufacturing of tissues and organs[J]. Progress in Polymer Science, 2012,37(8):1079-1104.
- [4] BUCHBINDER D, SCHLEIFENBAUM H, HEIDRICH S, et al. High power selective laser melting (HP SLM) of aluminum parts[J]. Physics Procedia, 2011,12:271-278.
- [5] BAUFELD B, VAN DER BIEST O, GAULT R. Additive manufacturing of Ti-6Al-4V components by shaped metal deposition: microstructure and mechanical properties[J]. Materials & Design, 2010, 31:106-111.
- [6] MURR L E, MARTINEZ E, AMATO K N, et al. Fabrication of metal and alloy components by additive manufacturing: examples of 3D materials science[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2012, 1(1):42-54.
- [7] HUANG S H, LIU P, MOKASDAR A, et al. Additive manufacturing and its societal impact: a literature review[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013,67(5-8):1191-1203.

[7] CAMPBELL I, BOURELL D, GIBSON I. Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age[J]. Rapid Prototyping Journal, 2012,18(4):255-258.

[8] 李涤尘, 苏秦, 卢秉恒. 增材制造——创新与创业的利器[J]. 航空制造技术, 2015(10):40-43.

LI Dichen, SU Qin, LU Bingheng. Additive manufacturing—tool for innovation and entrepreneurship[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(10):40-43.

[9] 林鑫, 黄卫东. 高性能金属构件的激光增材制造[J]. 中国科学:信息科学, 2015, 45(9):1111-1126.

LIN Xin, HUANG Weidong. Laser additive manufacturing of high-performance metal components[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2015,45(9):1111-1126.

[10] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造:实现宏微结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013,49(6):129-135.

LI Dichen, HE Jiankang, TIAN Xiaoyong, et al. Additive manufacturing: integrated fabrication of macro/microstructures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(6):129-135.

[11] DECKARD C R. Method and apparatus for producing parts by selective sintering: US4863538[P]. 1989-09-05.

[12] MEINERS W, WISSENBACH K, GASSER A. Shaped body especially prototype or replacement part production: DE19649849C1[P]. 1998.

[13] TOLOCHKO N K, MOZZHAROV S E, YADROITSEV I A, et al. Balling processes during selective laser treatment of powders[J]. Rapid Prototyping Journal, 2004,10(2):78-87.

[14] MEIER H, HABERLAND C. Experimental studies on selective laser melting of metallic parts[J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2008, 39(9):665-670.

[15] BADROSSAMAY M, CHILDS T H C. Further studies in selective laser melting of stainless and tool steel powders[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(5):779-784.

[16] WEN S F, LI S, WEI Q S, et al. Effect of molten pool boundaries on the mechanical properties of selective laser melting parts[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014,214(11):2660-2667.

[17] 刘睿诚, 杨永强, 王迪. 选区激光熔化成型金属零件上表面粗糙度的研究[J]. 激光技术, 2013, 37(4):425-430.

LIU Ruicheng, YANG Yongqiang, WANG

- Di. Research of upper surface roughness of metal parts fabricated by selective laser melting[J]. Laser Technology, 2013,37(4):425-430.
- [18] 赵志国, 柏林, 李黎, 等. 激光选区熔化成形技术的发展现状及研究进展[J]. 航空制造技术, 2014(19):46-49.
- ZHAO Zhiguo, BAI Lin, LI Li, et al. Status and progress of selective laser melting forming technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014(19):46-49.
- [19] 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.
- [20] GRIFFITH M L, KEICHER D M, ATWOOD C L, et al. Free form fabrication of metallic components using laser engineered net shaping (LENS)[C]. 1996 Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 1996.
- [21] WU X, 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.
- [22] CHAM J G, BAILEY S A, CLARK J E, et al. Fast and robust: hexapedal robots via shape deposition manufacturing[J]. The International Journal of Robotics Research, 2002, 21(10/11):869-882.
- [23] 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.
- [24] ARCELLA F G, FROES F H. Producing titanium aerospace components from powder using laser forming[J]. JOM, 2000, 52(5):28-30.
- [25] 林鑫, 黄卫东. 应用于航空领域的金属高性能增材制造技术[J]. 中国材料进展, 2015, 34(9):684-688.
- LIN Xin, HUANG Weidong. High performance metal additive manufacturing technology applied in aviation field[J]. Materials China, 2015, 34(9):684-688.
- [26] GRIFFITH M L, SCHLIENGER M E, HARWELL L D, et al. Understanding thermal behavior in the LENS process [J]. Materials & Design, 1999, 20(2):107-113.
- [27] GUNATNNA M, HENYR S, CLETON F, et al. Epitaxial laser metal forming: analysis of microstructure formation[J]. Materials Science & Engineering A, 1999, 271(1/2):232-241.
- [28] 宁国庆, 钟敏霖, 杨林, 等. 激光直接制造金属零件过程的闭环控制研究[J]. 应用激光, 2002,22(2):172-176.
- NING Guoqing, ZHONG Minlin, YANG Lin, et al. Research about close-loop control system during laser direct manufacturing metallic components[J]. Applied Laser. 2002,22(2):172-176.
- [29] 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, 2002,3(10):40-43.
- HUANG Weidong, LI Yanmin, FENG Liping, et al. Laser solid forming of metal powder materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2002,3(10):40-43.
- [30] 郭志飞, 张虎. 增材制造技术的研究现状及其发展趋势[J]. 机床与液压, 2015,43(5):148-151.
- GUO Zhifei, ZHANG Hu. Research status quo and development trend of additive manufacturing technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2015,43(5):148-151.
- [31] 姚妮娜, 彭雄厚. 3D 打印金属粉末的制备方法[J]. 四川有色金属, 2013,12(4):48-51.
- YAO Nina, PENG Xionghou. The preparation method of metal powder for 3D printing[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2013, 12(4):48-51.
- [32] 孙世杰. 增材制造使用的金属粉末将成为一个重要的研究方向[J]. 粉末冶金工业, 2015, 25(4):62.
- SUN Shijie. Metal powders for additive manufacturing will be a key part in metal additive manufacturing[J]. Powder Metallurgy Industry, 2015, 25(4):62.
- [33] 顾冬冬, 沈以赴. 基于选区激光融化的金属材料零件快速成形现状与技术展望[J]. 航空制造技术, 2012(8):32-37.
- GU Dongdong, SHEN Yifu. Research status and technical prospect of rapid manufacturing of metallic part by selective laser melting[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2012(8):32-37.
- [34] 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[J]. 中国激光, 2009(12):3204-3209.
- WANG Huaming, ZHANG Shuquan, WANG Xiangming. Progress and challenges of laser direct manufacturing of large titanium structural components[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009(12):3204-3209.
- [35] 王华明. 高性能大型金属构件激光增材制造:若干材料基础问题[J]. 航空学报, 2014,35(10):2690-2698.
- WANG Huaming. Materials' fundamental issues of laser additive manufacturing for high-performance lager metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10):2690-2698.

Research on Status and Development Trend of Laser Additive Manufacturing

YANG Qiang¹, LU Zhongliang^{1,2}, HUANG Fuxiang¹, LI Dichen¹

(1. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

[ABSTRACT] Additive manufacturing (AM), a digital manufacturing technology of rapid development, can form any complex parts directly from 3D CAD data. Laser additive manufacturing (LAM) is a representative kind of AM, which plays an important role in AM field. The development and research status of two typical kinds of LAM technology: selective laser melting (SLM) and laser metal direct forming (LMDF) are introduced based on expounding the basic principles and characteristics of LAM. Finally, the development trend of LAM is discussed.

Keywords: Laser additive manufacturing; Selective laser melting; Laser metal direct forming; Complex part

(责编 李舟)