

国外高能束增材制造技术应用现状与最新发展

陈济轮 杨洁 于海静

(首都航天机械公司, 北京 100076)



摘要: 介绍了国外以激光束、电子束为热源的高能束增材制造技术研究应用现状以及最新发展, 重点介绍了高能束增材制造技术在国外航空航天的应用案例, 对高能束增材制造技术的未来发展进行了展望。

关键词: 增材制造; 激光熔化沉积; 选区激光熔化成形; 电子束熔化成形

The Abroad Application and Latest Development of High-energy Beam Additive Manufacturing Technology

Chen Jilun Yang Jie Yu Hai jing

(Capital Aerospace Machinery Company, Beijing 100076)

Abstract: This paper introduces the application and the new development of high-energy beam additive manufacturing technology research by using laser beam and electron beam as heat resource. It mainly introduces the application example by using high energy beam additive manufacturing technology in foreign aeronautics and aerospace fields. Meanwhile this paper gives a further discussion for the future development also.

Key words: additive manufacturing; laser melting deposition; selective laser melting; electron beam melting

1 引言

增材制造技术(俗称 3D 打印)是近年来迅速发展起来的高端数字化制造技术。其中以激光束、电子束为能量源的高能束增材制造技术是该技术领域的重要发展方向, 该类技术在航空航天领域有良好的应用前景, 国内外都非常重视。

增材制造技术的共同特点是: 容易实现三维数字化制造, 尤其适合难加工材料、复杂结构零件的研制生产; 原材料利用率高, 符合绿色制造理念; 增材制造后的性能及质量优越, 有时可以实现结构减重; 无需借助刀具和模具就可以直接制造出产品, 响应速度快。

美国政府及欧盟都已通过政府资助、企业 R&D 资金等方式投入了大量的研发经费, 支持马歇尔宇航

中心、波音、洛克希德-马丁、通用电气以及欧洲的 EADS、罗尔-罗伊斯等为代表的大型航空航天军工企业, 采用“产、学、研”的方式进行增材制造技术的研究应用工作, 并已取得了长足的进展。

2 国外技术发展现状

金属材料增材制造技术是在航空航天领域关键件研制需求的牵引下诞生的, 经过 20 多年的发展, 增材制造经历了从萌芽到产业化、从原型展示到零件直接制造的过程, 发展十分迅猛。

2012 年 8 月, 美国增材制造创新研究院成立, 联合了宾夕法尼亚州西部、俄亥俄州东部和弗吉尼亚州西部的 14 所大学、40 余家企业, 把航空航天应用需求作为增材制造的优先研究目标。

作为美国制造业振兴计划项目的一部分,2012年8月美国政府高调宣布成立国家增材制造创新研究院(NAMRI);2011年3月英国工程和自然科学研究委员会(EPSRC)在诺丁汉大学成立增材制造技术创新中心;2013年1月欧空局(ESA)启动一项增材制造技术研究计划;澳大利亚也制定了增材制造技术发展路线图。

英国政府自2011年开始持续增大对增材制造技术的研发经费。英国工程与物理科学研究委员会中设有增材制造研究中心,参与机构包括拉夫堡大学、伯明翰大学、英国国家物理实验室、波音公司以及德国EOS公司等15家知名大学、研究机构及企业。

除了英美外,其它一些发达国家也积极采取措施,以推动增材制造技术的发展。德国建立了直接制造研究中心,主要研究和推动增材制造技术在航空航天领域中结构轻量化方面的应用;法国增材制造协会致力于增材制造技术标准的研究;在政府资助下,西班牙启动了一项发展增材制造的专项,研究内容包括增材制造共性技术、材料、技术交流及商业模式等四方面内容;澳大利亚政府于2012年2月宣布支持一项航空航天领域革命性的项目“微型发动机增材制造技术”,该项目使用增材制造技术制造航空航天领域微型发动机零部件,有力促进该技术在航空航天等领域的应用。

3 高能束增材制造技术研究应用现状

根据填充材料方式的不同,高能束增材制造可以分为预铺粉和同步送粉或送丝两种,结合激光、电子束两种高能束能量源,预铺粉的增材制造技术具体可分为激光选区熔化增材制造(SLM)技术以及选区电子束熔化增材制造(EBM)技术,同步送粉或送丝增材制造技术主要可分为激光熔化沉积(LMD)技术以及电子束熔丝沉积(EBFF)技术两种。

3.1 激光选区熔化(SLM)制造技术

激光选区熔化制造技术是将零部件CAD模型分层切片,采用预铺粉的方式,扫描振镜带动激光束在计算机控制下沿图形轨迹扫描选定区域的合金粉末层,使其熔化并沉积出与切片厚度一致、形状为零件某个横截面的金属薄层,直到制造出与构件CAD模型一致的金属零件。

SLM制造激光功率一般在数百瓦级,精度高(最高可达0.05mm)、质量好,加工余量很小或无加工余

量。除精密的配合面之外,制造的产品一般经喷砂或抛光等后续简单处理就可直接使用。适合中、小型复杂结构件(尤其是复杂薄壁型腔结构件)的高精度整体快速制造。

2003年底德国推出了世界上第一台SLM设备。近年来,德国EOS、Concept Laser、SLM Solutions、英国Renishaw等技术公司在激光选区熔化增材制造技术与设备方面取得了长足的进步。SLM设备采用的激光器几乎都采用高光束质量维护性好、光电转化效率高的光纤激光器。

为了进一步提高激光选区熔化增材制造技术的沉积效率,2012年11月,德国SLM-Solutions公司采用两台激光器/两台扫描振镜组成激光选区熔化增材制造成形系统,设备成形尺寸范围为500mm×280mm×325mm,两台激光扫描装置可以单独工作,也可以同时工作,能满足大型复杂构件的应用需求。

在应用方面,美国GE公司在各大型企业中率先成立金属材料激光熔化增材制造研发团队,并于2012年收购了Morris和RQM两家专业从事SLM制造技术的公司。GE公司将在LEAP喷气发动机中采用SLM制造燃油喷嘴。每台发动机预计19个燃油喷嘴。GE公司在未来三年内预计每年生产25000个燃油喷嘴,共计约10万个燃油喷嘴。

美国NASA马歇尔航天飞行中心的科学家和工程师们于2012年采用激光选区熔化成形技术制造了复杂结构金属零部件样件,用于“太空发射系统”重型运载火箭。

NASA认为这项技术可以极大地降低制造零件所需的时间,在一些情况下甚至将制造时间从数月降低至数周,提高了经济可承受性。由于不再需要把零部件焊接到一起,其结构强度得到提高,变得更加可靠,使整体火箭更加安全。NASA目前暂定在2017年第一次“太空发射系统”飞行试验中使用由激光选区熔化技术制造的零部件。

2013年8月,NASA对SLM制造的J-2X发动机喷注器样件进行了热试车,如图1所示,结果表明SLM制造的零件可完全满足发动机零件的设计使用要求。

美国加利福尼亚大学圣迭戈分校太空发展探索团队用3D打印方法制造火箭发动机推力室组件(图2)。相对于传统制造方法,3D打印技术为火箭发动机提供一种全新的制造方法。

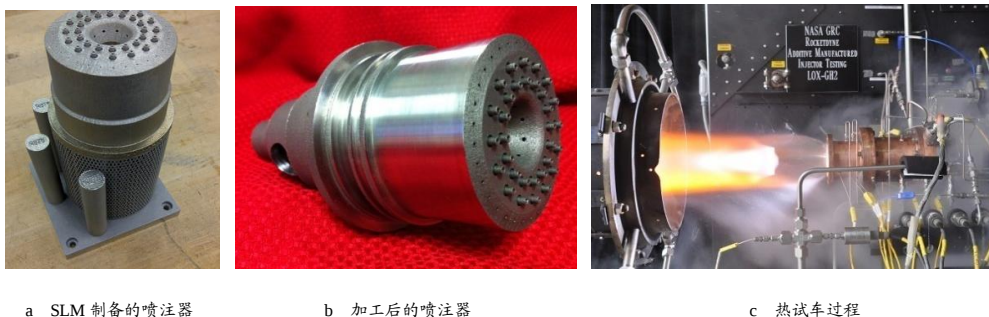


图1 J-2X发动机热试车



图2 3D打印的火箭发动机推力室组件

3.2 激光熔化沉积（LMD）制造技术

LMD 技术是采用同步输送的金属原料方法，按照 CAD 分层生成的图形文件，逐层沉积出三维金属零件实体的工艺过程。

LMD 的主要特点是同轴送粉、光斑直径大、激光功率大（数千瓦级）、粉末完全熔化、成形效率高，成形精度 1~3mm。适用一般用于形状相对复杂的大型金属构件毛坯的制备，零件在使用前需进行加工，加工余量较大。

在美国能源部研究计划支持下，Sandia 及 Los Alamos 国家实验室率先发展出称为 LENS 及 LMD 的技术，研究了不锈钢、镍基合金、钛合金、难熔金属材料组织及性能，并采用该项技术制造标准-3（SM3）导弹三维导向和姿态控制系统中的铍零件，可降低 50% 的制造成本和制造周期，显示出该技术在高性能金属零件直接成形方面的优势。

由于该技术在大型钛合金结构件直接成形方面的突出优势及其在飞机等装备研究生产中的广阔应用前景，高性能钛合金结构件的激光快速成形研究一直是该领域的研究重点。

美国加利福尼亚先进结构研究院设计了一种 MX3D 机器人（图 3）用于大型结构件制造，可实现大坡度结构件的制造。

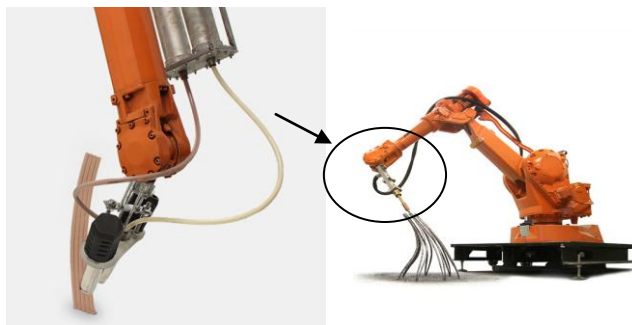


图3 用于3D打印的MX3D机器人

AirBus 公司的 A300 机型和 A350XWB 机型已经开始使用 3D 打印的零件，有些支架类零件可以减重 30%~55%，节省大量地原材料。

3.3 电子束增材制造技术

电子束增材制造是指利用计算机把零件的三维 CAD 模型进行分层处理，获得各层截面的二维轮廓信息并生成加工路径，以高能量密度的电子束作为热源，按照预定的加工路径，在真空室内熔化材料，逐层堆积，最终实现金属零件成形的技术。

电子束增材制造主要优点表现如下：在真空环境中进行，对处于高温状态的金属材料的保护效果更好，不易氧化，非常适合钛、铝等活性金属的加工；电子束容易达到几十千瓦级功率输出；零件综合力学性能好，尤其对钛合金材料制造的合金元素成分的保持性较好。

3.3.1 选区电子束熔化（EBM）制造技术

研究选区电子束熔化制造技术较好的是瑞典 Arcam 公司，该公司掌握了 EBM 关键技术及设备专利。由于该技术在粉末近净成形精度、效率、成本及零件性能等方面具有的独特优势，电子束快速成形的研究在国外发展很快。美国北卡罗来纳州大学、英国华威大学、德国纽伦堡大学、波音公司、美国 Synergeering 集团、德国 Fruth Innovative Technologien 公司及瑞典 VOLVO 公司积极开展了相关研究工作。

选区电子束熔化制造精度在 0.3mm 左右，电子束最大扫描速度可达 7km/s，还可以实现多电子束同时扫描成形制造。

3.3.2 电子束熔丝（EBFF）制造技术

电子束熔丝增材制造主要采用送丝的方式实现材料的添加。美国 Sciaky 公司开发的电子束熔丝增材制造设备，如图 4 所示。

电子束熔丝增材制造的功率可达几十千瓦级，制造精度约 2~4mm，对提高复杂结构大型工件的生产效率具有重要意义。

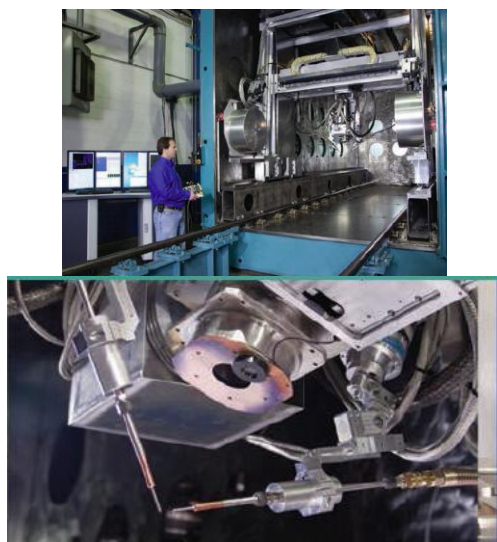


图4 电子束熔丝增材制造设备

3.4 复合材料增材制造技术

近几年美国 NASA 非常重视复合材料增材制造技术，先后在国际空间站宇航员用工具以及卫星巨型燃料箱的 3D 打印上取得了重要进展。据报道，NASA 计划于 2014 年向国际空间站发射一台 3D 打印设备用于宇航员工作用的非金属材料工具以及生活用餐具（图 5）的现场制造，以取代额外的仪器及硬件。

为了完善卫星设计、提高卫星载荷和有效利用空间，美国洛·马公司对卫星设计制造的一个重要变化

是巨型燃料箱（图 6）采用了 3D 打印技术。据报道该燃料箱长约 15 英尺（约合 4.572m），材料为聚碳酸酯，两周的时间可以打印一件大型燃料箱。



图5 3D打印的国际空间站非金属材料工具及餐具



图6 3D打印的卫星大型燃料箱

4 技术发展趋势

4.1 激光束和电子束增材制造技术将会协调发展

以激光束和电子束作为能量源的增材制造技术，二者各自特点的不同，都是先进的增材制造技术，在航空、航天等国防科技工业领域将会得到协调发展。

4.2 SLM 技术发展趋势

4.2.1 SLM 工艺向近无缺陷、高精度、新材料成形方向发展

SLM 制造精度最高，在钛合金、高温合金等典型航天材料复杂薄壁型腔构件的高性能、高精度制造中具有一定的优势，是近年来国内外研究的热点。根据目前检索到资料，SLM 离实现工程化应用仍然存在较多基础问题需要解决，未来需要在使用粉末技术条件

（下转第 10 页）