

文章编号:1674-8190(2019)03-309-10

增材制造(3D 打印)分类及研究进展

杨延华

(西安航空学院 机械工程学院,西安 710077)

摘要: 增材制造(3D 打印)近年来被国内外广泛研究和应用,但是目前尚无关于增材制造的系统、清晰和准确的分类。根据文献调研和现场调研,将增材制造技术分别按照制造材料种类、形态、热源、工艺组合等方法来进行划分,即增材制造技术可分为四大类 16 个小类,并且分别介绍各类增材制造技术原理、特点及其研究应用现状。最后指出目前增材制造材料单一与效率低等不足及向多元化、高效化、稳定化和包容化等发展的趋势。

关键词: 增材制造;3D 打印;分类方法

中图分类号: V261;TG669

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.03.003

Analysis of Classifications and Characteristic of Additive Manufacturing(3D Print)

Yang Yanhua

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The Additive Manufacturing(3D Print) was widely studied and used in recent years, but there wasn't a systematic, distinct and accurate classification about the Additive Manufacturing. The Additive Manufacturing was divided into 4 sorts and 16 sub sorts according to the category and state of the added materials and heat source of the manufacturing in this paper, as well as the principle, characteristics and trend of the each sorts of the Additive Manufacturing method were analyzed. Both the imperfections of the Additive Manufacturing, such as single material and low efficiency, and trends to multiple materials, high efficient, stable and compatible were presented in the end.

Key words: additive manufacturing; 3D print; classification method

0 引言

增材制造(3D 打印)是以数字模型为基础,按照一定分层厚度和预定堆积轨迹,将金属或非金属材料逐层叠加制造出特定模型或者结构的新兴制造技术。文献[1-2]介绍增材制造(Additive Manufacturing,简称 AM)技术是通过 CAD 设计数据

采用材料逐层累加的方法制造实体零件的技术,相对于传统的材料去除(切削加工)技术,是一种“自下而上”材料累加的制造方法。

美国增材制造技术咨询服务的 Wohlers 协会 2013 年度报告分析显示:2012 年增材制造设备与服务全球产值为 22.04 亿美元,与上年同期相比增长率为 28.6%,其中,设备材料为 10.03 亿美元,

收稿日期:2018-07-10; 修回日期:2018-11-10

基金项目:大学生创新创业训练计划项目(DCX2018023);西安航空学院校级科研基金(2015KY1211)

通信作者:杨延华,yyh97099@163.com

引用格式:杨延华. 增材制造(3D 打印)分类及研究进展[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3): 309-318.

Yang Yanhua. Analysis of classifications and characteristic of additive manufacturing(3D Print)[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(3): 309-318.

服务产值为 12 亿美元。在增材制造应用方面,消费商品和电子领域仍占主导地位,占比 21.8%;机动车领域占比 8.6%;医学和牙科领域占比 16.4%;工业设备领域占比 13.4%;航空航天领域占比 10.2%。全球设备拥有量方面,美国占比 38%,中国继日本和德国之后,以约 9%的数量居第四位。在设备产量方面,美国 3D 打印设备产量最高,占世界的 71%,欧洲以 12%、以色列以 10% 位居第二和第三,中国设备产量占 4%。

我国自 20 世纪 90 年代初,在国家科技部等多部门持续支持下,华中科技大学、清华大学、北京航空航天大学、西北工业大学、西安交通大学等在典型的成形设备、软件、材料等方面的研究和产业化方面获得了重大进展。目前,我国以及各省区域积极发展和支持增材制造,成立国家增材制造创新中心、西安增材制造国家研究院有限公司以及各地方 3D 打印中心等。国家增材制造创新中心位于西安,是工信部落实《中国制造 2025》首批布局的国家创新中心之一。创新中心对整合全国优势资源,聚集增材制造领域的优势科研团队、优势技术公司、主要工业界用户和投融资机构,促进增材制造共性技术研究、标准制定及产业化,推动装备制造业高端发展、工业转型升级具有十分重要的意义。西安增材制造国家研究院有限公司作为国家增材制造创新中心的依托公司和承载主体,由西安交通大学、北京航空航天大学、西北工业大学、清华大学和华中科技大学 5 所大学及增材制造装备、材料、软件生产及研发的 13 家重点企业于 2016 年共同组建,公司汇聚国内外高端人才及相关国家重点实验室、工程中心和工程实验室等科研资源,为国内制造业的转型和创新提供重要支撑,服务《中国制造 2025》。

近年来,伴随增材制造快速发展,继北京航空航天大学、西北工业大学等开发大尺寸飞机金属零件并在推广应用之后,3D 打印逐渐向航天、石油、化工、电子、医疗以及教育等多领域发展,打印设备从高端型逐步向低成本普及型发展,打印材料也从金属丝材、粉末、热熔塑料、液体树脂等多样化发展,打印模型逐渐从单一模型向高精度装配模型发

展,同时打印服务逐渐同个体化定制模式、互联网+、传统制造业向兼容和结合模式发展,逐渐形成响应新时代召唤下的“大众创新,万众创业”的 3D 打印新模式。

鉴于增材制造工艺及其材料快速发展,国内外对增材制造工艺分类有多种意见。2015 年 1 月 15 日,国际标准化组织 ISO 制定的标准 ISO 17296-2^[3],规定了增材制造工艺分类及原材料概览及其基本原则,其中对增材制造工艺进行分类。2015 年 12 月 15 日出版,ISO 联合 ASTM 发布标准 ISO/ASTM 52900^[4],给出增材制造相关术语以及主要工艺分类。由中国机械工业联合会提出,2017 年 12 月发布 2018 年 10 月 1 日实施的国家标准《GB/T35351-2017 增材制造术语》^[5],以及 2018 年 5 月 14 日发布将于 2019 年 3 月 1 日实施的《GB/T35021-2018 增材制造工艺分类及原材料》^[6],两个标准针对现有增材制造工艺进行分类,根据成形原理给出了 7 种增材制造工艺,分别为:立体光固化、材料喷射、粘结剂喷射、粉末床熔融、材料挤出、定向能量沉积和薄材叠层。

目前,鉴于增材制造材料和种类繁多,对增材制造分类不尽统一和全面。现行标准给出的增材制造分类均以制造工艺为单一依据,分类不够详尽和全面。因此,本文参考现行标准分类,通过国内外文献调研和分析,分别以制造材料属性、材料形态、制造热源、工艺组合为依据,对增材制造进行全面、系统分类,并给出各类增材制造工作原理、特点及应用情况,同时给出增材制造研究现状,最后研究分析增材制造存在的不足与发展趋势。

1 增材制造分类

增材制造的分类根据制造材料种类、制造工艺以及制造方法等的不同而不同,与此同时,同种材质零件的增材制造可以采用不同原料形状、不同热源等来实现。作者经过大量调研和仔细分析,将增材制造按照制造材料种类、形态、热源、工艺组合等方法来进行划分,如表 1 所示,同时各种分类可以交叉实施实现增材制造,从而引出较为主流的增材制造工艺。

表 1 增材制造分类

Table 1 Sorts of additive manufacturing

序号	按照制造材料种类划分	按照制造材料形态划分	按照制造热源划分	按照工艺组合划分
1	金属材料增材制造	粉末/颗粒材料增材制造	激光增材制造	单步增材制造
2	无机非金属材料增材制造	丝材增材制造	电子束增材制造	多步增材制造
3	有机高分子材料增材制造	带材/片材增材制造	电弧增材制造	复合增材制造
4	生物材料增材制造	液体材料增材制造	光固化增材制造	/
5	/	/	热熔增材制造	/

1.1 按照制造材料种类划分增材制造

首先,按照制造材料种类,增材制造可分为金属材料增材制造、有机高分子材料增材制造、无机非金属材料增材制造和生物材料增材制造。

(1) 金属材料增材制造

金属材料增材制造就是以金属材料为原料,包括金属粉末、丝材等形式,在高温热源下完成增材制造。适用于金属材料增材制造的材料包括:钛合金、镍合金、钢、铝合金和硬质合金等材料。目前工业应用较为广泛的就是金属材料增材制造,主要用于航空、航天、医学等领域。

(2) 有机高分子材料增材制造

有机高分子增材制造是以有机高分子材料为原料,包括专用树脂、超高分子量聚合物等材料,通过特定的热源形式,完成的增材制造。有机高分子增材制造原料包括专用光敏树脂、粘结剂、催化剂、蜡材以及高性能工程塑料与弹性体等。

(3) 无机非金属材料增材制造

无机非金属材料增材制造是以无机非金属材料为原料来完成的增材制造。作为三大材料之一的无机非金属材料也是增材制造的主要原料,包括:氧化铝、氧化锆、碳化硅、氮化铝、氮化硅等,形态主要有粉末和片材等^[7]。

(4) 生物材料增材制造

生物材料增材制造是以当今新型可植入生物材料为原料来完成的增材制造。生物材料增材制造大大拓展了生物医学视野,完善了个性化医疗器械的开发,不同软硬程度的器官、组织模拟材料,促进生物学进步。

1.2 按照制造材料形态划分增材制造

按照制造材料形态划分,增材制造可划分为粉

末/颗粒材料增材制造、丝材增材制造、带材/片材增材制造和液体材料增材制造等。

(1) 粉末/颗粒材料增材制造

粉末/颗粒材料增材制造是以粉末/颗粒材料为原料,在一定热源条件下完成的增材制造。可用于粉末/颗粒材料增材制造的材料包括金属、有机高分子材料、无机非金属材料等。

(2) 丝材增材制造

丝材增材制造是以丝材为原料,在一定热源条件下完成的增材制造。可用于丝材增材制造的材料包括金属、有机高分子材料等。

(3) 带材/片材增材制造

带材/片材增材制造是以带材/片材为原料,在一定条件下完成的增材制造。可用于带材/片材增材制造的材料包括金属材料、有机高分子材料、无机非金属材料等。

(4) 液体材料增材制造

液体增材制造是以液态材料为原料,在一定固化条件下完成的增材制造。可用于液态增材制造的材料包括有机高分子材料、无机非金属材料等,例如光敏液体树脂等材料。

1.3 按照制造热源划分

1.3.1 激光增材制造

激光增材制造是利用高密度高能量激光束为热源,在惰性气体保护环境中,在三维 CAD 模型分层的二维平面内,按照预定的加工路径,将同步送进的粉末或丝材逐层熔化,从而分层成型的一种制造技术。激光增材制造分为激光选区增材制造和激光熔丝增材制造。激光增材制造主要适用于小尺寸、形状复杂的金属构件的精密快速成形。具有尺寸精度高、表面质量好、致密度高和材料浪费少的优势,已经成为金属零件 3D 打印成型领域中的重要技术之一。

(1) 激光熔丝增材制造技术

激光熔丝增材制造是利用激光为热源将金属丝材按照一定预设路径分层堆积成型,从而形成实体零件。激光熔丝增材制造系统通常是由激光发生器、送丝系统、3D 平台、真空系统等组成。激光熔丝增材制造工作原理如图 1 所示:首先将垫板置于 3D 工作台上,送丝系统将金属丝材送丝至指定路径位置,激光系统发射激光,将金属丝材熔化,随即凝固成型为增材制造堆积材料,3D 工作台按照预设路径在 xy 平面上移动,形成单层金属丝材增材制造后,3D 工作台再在 z 向进行移动,进行下一层工件增材制造,直至完成整个零件增材制造。

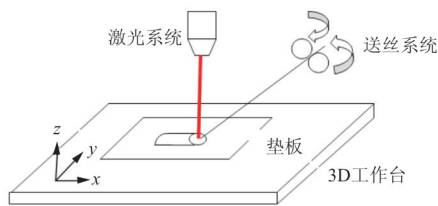


图 1 激光熔丝增材制造工作原理

Fig. 1 Schematic diagram of Laser fused wire additive manufacturing

(2) 激光选区熔化增材制造技术

激光选区增材制造是利用激光束,按照预定路径,将预先铺设在二维截面上的金属粉末熔化,由下而上逐层熔化凝固形成实体零件。激光选区增材制造系统通常是由激光系统、送粉系统、3D 平台、真空系统等部分组成。激光选区增材制造工作原理如图 2 所示:首先将垫板即挡板置于 3D 工作台上,送粉系统将金属粉末铺满于挡板内,激光系统发射激光,将金属粉末熔化,随即凝固成型为增材制造堆积材料,3D 工作台按照预设路径在 xy 平面上移动,形成单层粉末增材制造后,3D 工作台再在 z 向进行移动,进行下一层增材制造,直至完成整个零件增材制造。

利用该技术可以制造出传统方法无法加工的任意形状的复杂结构,例如轻质点阵夹芯结构、空间曲面多孔结构、复杂型腔流道结构等。相较于电子束选区熔化技术,激光选区熔化由于所使用的粉末尺寸小($\leq 50 \mu\text{m}$)、分层薄($\leq 0.05 \text{ mm}$),因此具有很高的尺寸精度($\pm 0.05 \text{ mm}$)和表面质量(粗糙度 $Ra \leq 10$),能够实现无余量加工^[8]。

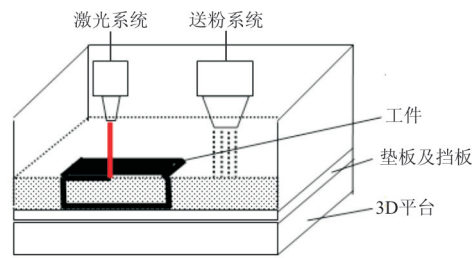


图 2 激光选区增材制造工作原理图

Fig. 2 Schematic diagram of selective Laser additive manufacturing

1.3.2 电子束增材制造

电子束增材制造是以高能电子束为热源,对金属材料连续扫描熔融,逐层熔化生成致密零件。其工艺原理同激光增材制造类似,分为电子束选区熔化增材制造和电子束熔丝增材制造。

(1) 电子束熔丝增材制造

电子束熔丝增材制造是指在真空环境中,高能量密度的电子束轰击金属表面形成熔池,金属丝材通过送丝装置送入熔池并熔化,同时按照预先规划的路径运动,金属材料逐层凝固堆积,形成金属零件或毛坯。电子束熔丝增材制造工作原理如图 3 所示,其工作原理与激光熔丝增材制造类似,只是热源不同,因此这里不再详述。电子束熔丝沉积技术主要优点包括:①沉积效率高。电子束可以实现数十千瓦大功率输出,可以达到很高的沉积速率,每小时 $10 \sim 20 \text{ kg}$,适于大型金属结构的成形。②真空环境有效避免空气中有害杂质在高温状态下影响金属冶金质量,适于钛、铝等活性金属的制造。

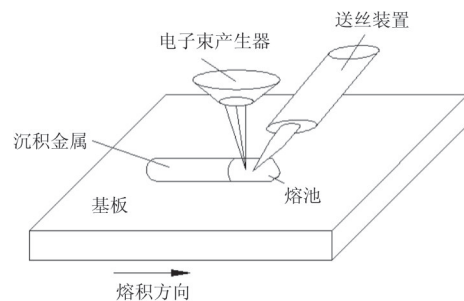


图 3 电子束熔丝沉积成形原理图

Fig. 3 Schematic diagram of electron beam fused wire additive manufacturing

(2) 电子束选区熔化成形技术

电子束选区熔化成形技术是指电子束按预先

设定的路径扫描和移动,将预先铺放的金属粉末逐层熔化凝固成型堆积,制造出金属零件。整个加工过程均处于真空环境中,能有效避免空气中有害杂质的影响。电子束选区熔化技术原理图如图 4 所示,其工作原理与激光选区增材制造类似,只是热源不同,因此这里也不再详述。与激光增材制造相比,电子束增材制造主要优势为制造效率高,主要劣势为伴随电子束过程产生的 X 射线影响。

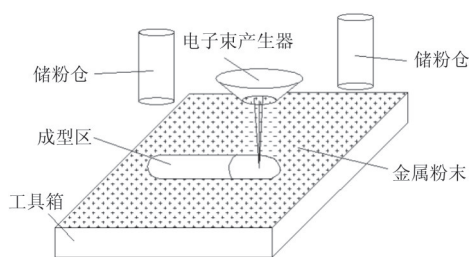


图 4 电子束选区熔化技术原理图

Fig. 4 Schematic diagram of electron beam selective additive manufacturing

早在 20 世纪 90 年代,美国麻省理工学院的 V. R. Dave 等提出利用电子束将金属材料熔化后进行三维制造的想法^[9]。随后瑞典的 Arcam 公司申请了该项专利并制造出电子束增材制造设备^[10]。2017 年 2 月,空客公司从美国 Sciaky 公司采购的 EBAM 110 电子束增材制造系统开始用于 3D 打印飞机钛合金结构件^[11]。随着沉积速度的提高,EBAM 能在几小时或几天内生产出大型尺寸零件^[12]。

西北有色金属研究院等牵头起草了国家标准《GB/T 34508-2017 粉床电子束增材制造 TC4 合金材料》^[13],于 2017 年 10 月 14 日发布,2018 年 5 月 1 日实施。标准规定了粉床电子束选区熔化增材制造 TC4 合金材料的要求、试验方法、检验规则和标志、包装、运输、贮存、质量证明书及合同(或订货单)内容等。适用于以粉床电子束选区熔化增材制造工艺制造的 TC4 合金致密材料。

(3) 电弧增材制造

电弧增材制造以电弧为热源,采用逐层堆焊的方式制造金属实体构件,该技术主要基于 TIG, MIG, SAW 等焊接技术发展而来,成形零件由全焊缝构成,化学成分均匀、致密度高,相对开放成形环境对成形件尺寸无限制,成形速率可达每小时数

公斤,但电弧增材制造的零件表面波动较大,成形件表面质量较低,一般需要二次表面机加工,相比激光、电子束增材制造,电弧增材制造技术的主要应用目标是大尺寸复杂构件的低成本、高效快速近净成形。由于其基于堆焊技术发展起来,具有低成本、高效率的优点。

电弧送丝增材制造技术在过去 20 年一直是学者们研究的热点。常用的电弧增材制造方法包括:熔化极气体保护焊(GMAW)、非熔化极气体保护焊(GTAW)和等离子弧焊(PAW),其原理如图 5 所示。

熔化极气体保护焊 GMAW 是电弧在电极和基板之间燃烧,焊丝通常垂直于基板,主要有四种过渡方式,分别为:大滴过渡、短路过渡、射流过渡以及射滴过渡。除此之外,冷金属过渡的焊接方法也经常用在增材制造过程中,该方法具有焊接速度快、成型效率高、热输入低等优点,适于钛、不锈钢等制造。

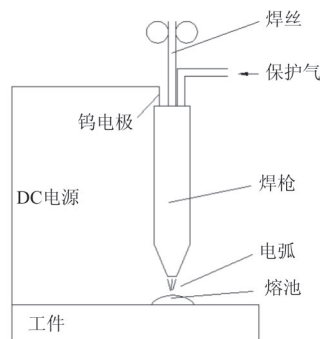


图 5 电弧增材制造工作原理

Fig. 5 Schematic diagram of arc and wire additive manufacturing

(4) 光固化增材制造

光固化增材制造是针对特种专业树脂,液体或者膏体材料,例如环氧树脂,在紫外光作用下引起树脂高速聚合、交联反应形成,从而完成光固化增材制造。

光固化技术在增材制造方面应用也日益增加。光固化打印机原理是聚合物单体与预聚体组成光引发剂(光敏剂),经过紫外光(波长范围:250~405 nm)照射后,引起聚合反应,形成固化实现液体树脂增材制造。光固化增材制造主要劣势为:树脂成型过程中由于发生收缩,导致固化速度慢、光

敏材料强度不高等缺点,突破这些难点是光固化增材制造今后发展方向。

目前,光固化增材制造技术较为成熟,2013年6月1日编著的《增材制造技术系列丛书:液态树脂光固化增材制造技术》^[14],系统介绍了光液态树脂的分层光固化技术,包括数字化建模、数据处理、液态树脂光固化成形、光固化树脂材料、液态树脂光固化成形系统应用操作和快速制模技术等方面内容。香港的 SparkMaker 公司自 2015 年就研发开发出桌面光固化 3D 打印机,如图 6 所示。该打印机可打印工件尺寸范围为 98 mm×55 mm×125 mm,打印精度 xy 方向可以达到 100 μm , z 向层厚精度可达 10 μm ,可以用于制作工件或者工件原型^[15]。

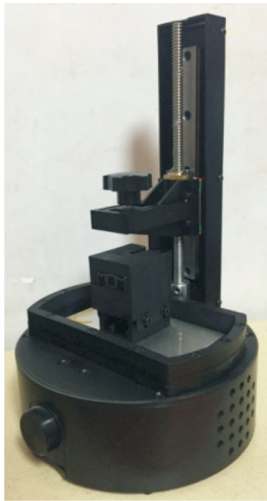


图 6 SparkMaker 光固化 3D 打印机

Fig. 6 Stereo lithography 3D printer of SparkMaker

(5) 热熔增材制造

热熔增材制造又称熔融沉积成型(Fused Deposition Modeling,简称 FDM),该工艺是将丝状材料,例如热塑性塑料、蜡或金属的熔丝加热为熔融流体后从喷嘴挤出,按照预定轨迹和速率将熔融流体堆积成型,从而凝固成型为工件。其工作原理如图 7 所示。熔融沉积成型优点是材料利用率高,浪费少;同时,可选材料种类多,包括热塑性塑料、蜡或低熔点金属等;工艺简洁简单,适合办公室环境。缺点是表面粗糙度低,不适宜制造复杂结构工件。该工艺适合于精度要求不高的小型概念模型或原型模型制造。

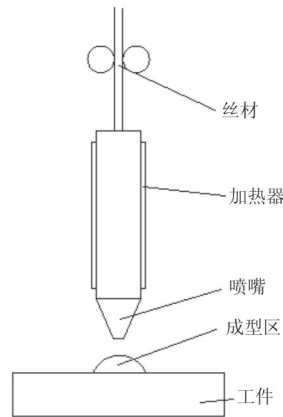


图 7 热熔增材制造工作原理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of hot melt additive manufacturing

1.4 按照工艺组合划分增材制造

按照工艺组合划分,增材制造可划分为单步增材制造、多步增材制造和复合增材制造。

(1) 单步增材制造

单步增材制造是指采用单步操作(打印)完成零件或实物制造的增材制造工艺,可以得到预期基本几何尺寸和基本性能^[6]。这里的“步”应该理解为道或次。单步,即为单道或单次,例如采用单一打印工艺将单一材料一步打印获得预期零件或实物。

(2) 多步增材制造

多步增材制造是指采用两步或者两步以上操作(打印)完成零件或实物制造的增材制造工艺,可以得到预期基本几何尺寸和基本性能^[6]。例如打印异质材料或者功能梯度材料需要的多步打印才能得到预期零件或实物。

(3) 复合增材制造

复合增材制造是在增材制造单步工艺过程中,同时或者分步结合一种或者多种增材制造、等材制造或减材制造,完成零件或实物制造的工艺^[6]。增材制造同传统制造工艺,例如焊接、铸造、机械加工等组合形成新的复合增材制造工艺。

2 增材制造研究进展

自 20 世纪 90 年代起,增材制造技术在国内外得到广泛研究和关注,增材制造设备的开发日趋完

善和多样化,增材制造成果的应用领域和范围逐渐扩大。金属高性能增材制造技术主要包含以激光立体成形技术为代表的同步送粉(送丝)高能束(激光、电子束、电弧等)熔覆技术和以选区激光熔化技术为代表的粉末成形技术两个技术方向^[16]。应用较为广泛的增材制造技术包括:电子束熔丝沉积技术、电子束选区熔化成形技术、激光熔化沉积制造技术、激光选区熔化增材成形技术等^[17]。

激光立体成形技术是可以实现复杂高性能构件的高效率制造(可达3 kg/h),力学性能可以达到锻件水平,同时,可以实现同一构件上多材料的复合和梯度结构制造。选区激光熔化技术力学性能能够实现优铸件水平,可以实现复杂性构件制造,沉积效率要比激光立体成形技术低1~2个数量级。更重要的是,激光立体成形技术可同传统的加工技术,例如机械加工或电化学加工等等材或减材加工技术相结合,充分发挥各种增材与等材及减材加工技术的优势,形成金属结构件的整体高性能、高效率、低成本成形和修复的新加工技术。

美国是开展增材制造研究和应用较早的国家之一,2000年率先实现飞机承力结构件,例如钛合金支架、吊耳、框、梁等,航空发动机零件,例如镍基高温合金单晶叶片等的增材制造并投入应用。2001年,美国Sciaky公司联合Lockheed Martin和Boeing公司开展了大型航空钛合金零件的电子束熔丝沉积技术研究^[18]。2013年,装有钛合金垂尾等电子束熔丝沉积技术制造零件的F35试飞成功。美国Boeing公司在航空制造领域应用增材制造走在世界前列,已在X-45,X-50无人机的F-18,F-22战斗机项目中应用了聚合物增材制造和金属增材制造技术。

法国空客公司也于2006年启动了起落架金属增材制造研发工作。2014年3月,该公司与西北工业大学签订了基于大型钛合金构件激光立体成形合作框架协议,开始系统论证采用LSF技术制造个别飞机零部件。

在国内,北京航空航天大学与沈阳飞机设计研究所、第一飞机设计研究院、沈阳飞机工业集团公司、西安飞机工业集团公司等单位“产学研”合作,在2005年实现了激光增材制造钛合金小型、次承力结构件在某型号飞机上装机工程应用,并在

2007年实现了飞机钛合金大型、主承力构件的激光增材制造,并且掌握了装备、工艺等成套技术^[19]。

2011年,西安交通大学对镍基合金激光熔化沉积凝固组织演化规律进行了长期研究并制造出了高表面质量和几何尺寸精度的复杂空心叶片样件^[20]。2016年,装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室采用脉冲等离子工艺增材再制造了Inconel718镍基高温合金,但是晶粒粗大而不均,晶粒尺寸自底部向顶部逐渐增大,分别为19.2 μm、29.3 μm和34.1 μm,并有MC碳化物弥散分布于晶界。可见采用脉冲等离子工艺增材再制造Inconel718工艺还需进一步研究和试验^[21]。丝材电弧增材制造技术适于大尺寸且形状较复杂构件的低成本、高效快速成形,是与目前发展较成熟的激光增材制造方法优势互补的3D增材成形技术。丝材电弧增材制造技术处于试验研究阶段,还需更深入,系统地从成形物理过程、熔池系统稳定性、组织演变规律和性能优化等角度开展研究工作^[22-23]。

增材制造同传统制造工艺,例如焊接、铸造、机械加工等组合,发展成为新的特种加工系统或装备。2016年,文献[24]开发一种电弧增材制造与铣削复合加工的系统,可实现先增材制造再铣削,为提高零件增材制造效率和成形质量提供了一种新的途径。

近年来,增材制造在医学领域研究和应用成功案例较多。西安交通大学第二附属医院从2012年开始开展3D打印技术重建脊柱脊髓功能的临床应用研究,目前成功完成临床试验。2016年,金属3D打印椎体假体通过医疗器械注册认证。2017年,广东省首例3D打印人工椎体植入手术中使用的3D打印人工椎体。2018年2月,南方医院使用3D打印人工椎体/椎间盘一体化植入物成功实施了植入手术。2018年8月,陆军军医大学大坪医院成功实施3D打印人工颈椎椎体植入手术。与此同时,医疗行业内3D打印软组织研究及应用也开始启动,2018年9月,首个软组织增材制造实验室——广东省软组织生物制造工程实验室建成投用^[25]。

此外,4D打印也迅速开展。2013年2月,美

国麻省理工学院斯凯拉·蒂比茨(Skylark Tibbits)在 TED2013 会议上首次公开展示了他与美国全球 3D 打印技术引领者 Stratasy 公司合作突破的 4D 打印技术成果,用 3D 打印机“特殊墨水”打出的“智能材料”与水接触时自动折叠成字母“MIT”^[26]。4D 打印技术是指打印智能材料,智能材料结构在 3D 打印基础上实现自身的结构变化,即由 3D 打印技术制造的智能材料结构,在外界环境激励下可以随时间产生形状结构的变化^[2]。4D 打印智能材料包括形状记忆合金、形状记忆聚合物、压电材料、电致活性聚合物、光驱动型聚合物、水驱动结构等智能材料,结构激励方式包括温度、光、电、压力、水等条件或方式。2014 年,文献[2]研究了形状记忆聚合物(SMP)的 3D 打印技术,利用熔融沉积成型(FDM)技术将 SMP 材料加热、熔化、挤出,形成 SMP 三维实体结构,再通过调节环境温度完成形状变化,实现 SMP 材料 4D 打印技术。文献[27]讨论了 4D 打印未来的军事应用,包括其在制造隐身、自修复、自毁等材料以及武器、作战平台及其零部件,在制作防护服、伪装工事、天线和太阳能阵列板等方面的应用前景。文献[28]探讨了 4D 打印或将对导弹武器装备制造流程、研制成本、研发周期以及导弹武器性能优化方面产生深远的影响。文献[29]结合卫星有效载荷技术发展的需求,对 4D 打印技术在卫星有效载荷中的应用进行了展望,包括空间机构的展开控制、天线幅面的在轨形变控制、空间环境下的温度自反馈控制以及在轨自修复等。文献[30]探讨了 4D 打印在航空飞行器智能变体结构,新一代热防护及新型隐身技术方面的应用潜力。文献[31]介绍了 4D 打印形状记忆聚合物材料研究进展,成形方式及其在各领域的应用。可见,4D 打印技术研究处于起步阶段,还需要在智能材料种类、智能材料结构打印工艺以及结构激励方式等方面展开深入研究,方可在材料科学、制造产业、航空航天、生物工程及医学等领域中的突出成果以及创新性技术,才能够在医疗、军事、航天等领域得到广泛应用^[32-33]。

综上,增材制造在航空航天、医疗卫生、工业建筑等行业广泛深入研究,并且取得一定成果和基础,伴随工业 4.0 和物联网时代到来,给增材制造发展将带来无比生机,增材制造逐渐向多元化、高

效化、稳定化和包容化等方向发展。

3 结束语

过去近 20 多年来,增材制造技术在国内得到广泛研究和关注,并在航空航天、医疗、教育等行业工业化应用取得重大突破,但是增材制造技术在制造材料、制造效率、制造质量等方面受到制约,因而今后在这些方面需要突破,是重要研究和发展趋势。一是制造材料从单一材料向多元化发展,增材制造目前仅适应于单一材料的增材制造,现在不能满足多元材料功能特性的工业需求,因此增材制造多元材料、多功能材料、梯度功能材料、智能材料等是今后增材制造的必然趋势。二是制造效率从低效率向高效化发展,同传统制造技术相比,制造效率一直是增材制造致命劣势,尤其是金属材料增材制造,从每小时几十克至数千克,光固化增材制造效率不足 $2 \times 10^6 \text{ mm}^3/\text{h}$ 。因此,为满足新工业时代发展需要,不论是金属材料增材制造还是非金属增材制造,提高制造效率是重要攻关内容。三是制造产品质量从随机性向稳定化发展,目前增材制造的材料和工艺尚不稳定,制造工件单件化,其内在组织和性能呈现随机性和偶发性,增材制造产品质量受增材制造工艺、热力学、增材制造材料热物理性能等多因素交互影响,制造缺陷和热应力难于避免和控制。因此,今后增材制造产品内部质量、成型精度逐渐从随机性向稳定化发展,并且产品结构从简单化向复杂化发展、从非承载向承载方向发展。四是制造工艺从单一性向包容化发展,伴随工业时代 4.0 以及物联网的快速发展,单一增材制造不再满足发展需求,增材制造向同互联网+、定制式的包容方向发展,以及同传统加工技术组合与包容化方向发展。

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 & Automation, 2013, 42(4): 1-4. (in Chinese)
- [2] 李涤尘,刘佳煜,王延杰,等.4D打印-智能材料的增材制造技术[J].机电工程技术,2014,43(5):1-9.
Li Dichen, Liu Jiayu, Wang Yanjie, et al. 4D printing-additive manufacturing technology of smart materials[J]. M &

- E Engineering Technology, 2014, 43(5): 1-9. (in Chinese)
- [3] ISO. ISO17296-2: 2015 Additive manufacturing-general principles-part 2: overview of process categories and feedstock[S]. Switzerland: ISO, 2015.
- [4] ISO. ISO/ASTM 52900: 2015 (E) Standard terminology for additive manufacturing-general principles-terminology [S]. Switzerland: ISO, 2015.
- [5] 李海斌, 薛莲, 金宇飞, 等. GB/T35351-2017 增材制造术语[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Li Haibin, Xue Lian, Jin Yufei, et al. GB/T35351-2017 Additive manufacturing-terminology[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [6] 刘永辉, 单忠德, 张海鸥, 等. GB/T35021-2018 增材制造工艺分类及原材料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Liu Yonghui, Shan Zhongde, Zhang Hai'ou, et al. GB/T35021-2018 Additive manufacturing process categories and feedstock[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [7] 于云, 史廷春, 孙芳芳, 等. 典型无机非金属材料增材制造研究与应用现状[J]. 材料导报, 2016(21): 119-129.
- Yu Yun, Shi Tingchun, Sun Fangfang, et al. Study and application status of additive manufacturing of typical inorganic non-metallic materials [J]. Materials Review, 2016 (21): 119-129. (in Chinese)
- [8] 巩水利, 锁红波, 李怀学. 金属增材制造技术在航空领域的发展与应用[J]. 航空制造技术, 2013, 433(13): 66-71.
- Gong Shuili, Suo Hongbo, Li Huaixue. Development and application of metal additive manufacturing technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 433(13): 66-71. (in Chinese)
- [9] Dave V R, Matz J E, Eagar T W. Electron beam solid freeform fabrication of metal parts[C]. Proceedings of the 6th Solid Freeform Fabrication Symposium, University of Texas Austin, USA, 1995: 64-71.
- [10] 邢希学, 潘丽华, 王勇, 等. 电子束选区熔化增材制造技术研究现状分析[J]. 焊接, 2016(7): 22-26.
- Xing Xixue, Pan Lihua, Wang Yong, et al. Research status analysis of electron beam 3D printing technology[J]. Welding & Joining, 2016(7): 22-26. (in Chinese)
- [11] 任晓华. Sciaky 公司电子束增材制造技术获得新发展[EB/OL]. (2017-01-24) [2018-07-10]. http://www.sohu.com/a/125059807_313834.
- Ren Xiaohua. New development of Sciaky in electron beam additive manufacturing technology[EB/OL]. (2017-01-24) [2018-07-10]. http://www.sohu.com/a/125059807_313834. (in Chinese)
- [12] 黄卫东, 林鑫, 陈静, 等. 激光立体成形[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- Huang Weidong, Lin Xin, Chen Jing, et al. Laser solid forming[M]. Xi'an: Press of Northwest Polytechnic University, 2007. (in Chinese)
- [13] 朱纪磊, 汤惠萍, 贺卫卫, 等. GB/T34508-2017, 粉末电子束增材制造 TC4 合金材料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Zhu Jilei, Tang Huiping, He Weiwei, et al. GB/T34508-2017 Additive manufacturing with TC4 alloys powder by bed electron beam melting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)
- [14] 莫健华. 液态树脂光固化增材制造技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2013.
- Mo Jianhua. Additive manufacturing technology of liquid resin UV curing[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2013. (in Chinese)
- [15] Sparkmaker. Applications of sparkmaker[EB/OL]. [2018-07-10]. <https://www.sparkmaker3d.com>
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] 陈济轮, 杨洁, 于海静. 国外高能束增材制造技术应用现状与最新发展[J]. 航天制造技术, 2014(4): 1-5.
- Chen Jilun, Yang Jie, Yu Haijing. The abroad application and latest development of high-energy beam additive manufacturing technology[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2014(4): 1-5. (in Chinese)
- [18] Lockheed Martin Corporation. Metak 3D orubtubg news [EB/OL]. [2018-07-10]. <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2011/november/LockheedMartinSciakyIncEn.html>
- [19] 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 large metallic components[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2690-2698. (in Chinese)
- [20] Lu Z L, Li D C, Tong Z Q, et al. Investigation into the direct laser forming process of steam turbine blade[J]. Optics & Lasers in Engineering, 2011, 49(9/10): 1101-1110.
- [21] 王凯博, 吕耀辉, 刘玉欣, 等. 脉冲等离子增材再制造 Inconel718 合金的组织演变[J]. 金属热处理, 2016, 41(9): 1-5.
- Wang Kaibo, Lü Yaohui, Liu Yuxin, et al. Microstructural evolution of Inconel 718 Ni-based superalloy remanufactured by pulsed plasma arc[J]. Heat treatment of metals, 2016, 41(9): 1-5. (in Chinese)
- [22] 熊江涛, 耿海滨, 林鑫, 等. 电弧增材制造研究现状及在航空制造中应用前景[J]. 航空制造技术, 2015, 493(S2): 80-85.
- Xiong Jiangtao, Geng Haibin, Lin Xin, et al. Research status of wire and arc additive manufacture and its application in aeronautical manufacturing[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015, 493(S2): 80-85. (in Chinese)
- [23] 耿海滨, 熊江涛, 黄丹, 等. 丝材电弧增材制造技术研究现

- 状与趋势[J]. 焊接, 2015(11): 17-21.
- Geng Haibin, Xiong Jiangtao, Huang Dan, et al. Research status and trends of wire and arc additive manufacturing technology[J]. Welding and Joining, 2015(11): 17-21. (in Chinese)
- [24] 夏然飞, 樊建勋, 李新宇, 等. 电弧增材制造与铣削复合加工系统与工艺研究[J]. 制造业自动化, 2016, 38(9): 79-83.
- Xia Ranfei, Fan Jianxun, Li Xinyu, et al. Research on a hybrid machining system and process based on wire arc additive manufacturing and milling[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(9): 79-83. (in Chinese)
- [25] 工业和信息化部工业文化发展中心. 陆军军医大学大坪医院成功实施 3D 打印人工颈椎椎体植入手术[EB/OL]. [2018-07-10]. <http://www.miit3d.com/miit3d/swyl/1351.jhtml>
- Industrial Culture Development Center of MIIT. Daping hospital of the army military medical university successful implementation of 3d printing artificial cervical vertebral implants[EB/OL]. [2018-07-10]. <http://www.miit3d.com/miit3d/swyl/1351.jhtml>. (in Chinese)
- [26] 邓甲昊, 王莹. 4D 打印[J]. 科技导报, 2013(31): 11.
- Deng Jiahao, Wang Xuan. 4D printing[J]. Science Technology Review, 2013(31): 11. (in Chinese)
- [27] 王群. 4D 打印及其军事应用前景[J]. 国防科技, 2016, 37(4): 36-39.
- Wang Qun. 4D printing and its military application prospects[J]. National Defense Science & Technology, 2016, 37(4): 36-39. (in Chinese)
- [28] 葛悦涛, 蒋琪. 4D 打印技术对导弹工业与导弹性能的影响[J]. 战术导弹技术, 2016(6): 14-17.
- Ge Yuetao, Jiang Qi. Influence of 4D printing technology on missile industry and its performance[J]. Tactical Missile Technology, 2016(6): 14-17. (in Chinese)
- [29] 汪新刚, 邵兆申. 4D 打印技术在卫星有效载荷中的应用展望[J]. 空间电子技术, 2016, 13(3): 96-100.
- Wang Xin'gang, Shao Zhaoshen. 4D printing technology applying prospect in payload on satellites[J]. Space Electronic Technology, 2016, 13(3): 96-100. (in Chinese)
- [30] 苏亚东, 王向明, 吴斌, 等. 4D 打印技术在航空飞行器研制中的应用潜力[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 59-69.
- Su Yadong, Wang Xiangming, Wubin, et al. Application potential of 4D printing technology in development of aircraft[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(2): 59-69. (in Chinese)
- [31] 魏洪秋, 万雪, 刘彦菊, 等. 4D 打印形状记忆聚合物材料的研究现状与应用前景[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(1): 2-16.
- Wei Hongqiu, Wan Xue, Liu Yanju, et al. 4D printing of shape memory polymers: research status and application prospects[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(1): 2-16. (in Chinese)
- [32] 陈花玲, 罗斌, 朱子才, 等. 4D 打印: 智能材料与结构增材制造技术的研究进展[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(2): 1-12.
- Chen Hualing, Luobin, Zhu Zicai, et al. Progress in additive manufacturing technology of smart materials and structure[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(2): 1-12. (in Chinese)
- [33] 王亚男, 王芳辉, 汪中明, 等. 4D 打印的研究进展及应用展望[J]. 航空材料学报, 2018, 38(2): 70-76.
- Wang Yanan, Wang Fanghui, Wang Zhongming, et al. Research progress and application perspectives of 4D printing[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2018, 38(2): 70-76. (in Chinese)

作者简介:

杨延华(1976—),女,硕士,副教授。主要研究方向:机械材料及材料。

(编辑:沈惺)