

【编者按】由卢秉恒院士、李涤尘教授撰写的《增材制造(3D打印)技术发展》一文,曾发表于《机械工程导报》2012年11/12月刊。在征得作者同意并经作者修改后,本刊予以发表,以飨读者。

增材制造概念的提出始于20世纪80年代后期,我国则始于90年代初开始研究。经过短短20余年的时间,这一技术已取得了飞速发展,在航空航天、微纳制造、生物医学工程等诸多领域的应用前景十分广阔。本文作者介绍了增材制造技术、设备和应用情况,阐述了国内外增材制造技术发展的现状及发展趋势。可以预见,随着研究的不断深入,增材制造技术必将成为具有巨大发展潜力的制造技术,给装备制造业带来革命性的变化。本刊希望通过对此文的发表,能引起方方面面对增材制造技术的认识、了解与重视,探索增材制造技术对传统制造领域乃至更大工业领域带来的影响,为提升我国装备制造业水平作出贡献。

增材制造(3D打印)技术发展

卢秉恒^a 李涤尘^b

(西安交通大学 a 机械工程学院; b 机械制造系统工程国家重点实验室
快速制造国家工程研究中心 西安交通大学 陕西 西安 710049)

摘 要: 增材制造技术俗称3D打印技术,是近30年快速发展的先进制造技术,其优势在于三维结构的快速和自由制造,被广泛应用于新产品开发、单件小批量制造。本文介绍了增材制造技术设备和应用情况,阐述国内外增材制造技术发展现状,说明增材制造技术发展趋势和关键技术。

关键词: 增材制造; 3D打印; 发展状况; 发展趋势

中图分类号: TG669 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2013)04-0001-04

Development of the Additive Manufacturing (3 D printing) Technology

LU Bing-heng^a , LI Di-chen^b

(a Collge of Mechanical Engineering; b State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering ,
National Engineering Research Center of Rapid Manufacturing; Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049 , China)

Abstract: Additive Manufacturing technology , Commonly known as the 3D printing technology , is one of the advanced manufacturing technology which has developed rapidly in recent 30 years. It is adept at rapid and free - forming fabrication of 3D structures and widely used in new products development and single - piece or small - batch production. The development state of additive manufacturing (3D printing) systems and applications both at home and abroad are introduced , and the development trends and key technologies in the future are discussed in this paper.

Key words: additive manufacturing; 3D printing; development situation; development trend

作者简介: 卢秉恒(1945-) 男,安徽毫州人,教授,博士生导师,中国工程院院士,西安交通大学机械工程学院院长,兼任国家自然科学基金咨询委员会委员,国务院学位办机械学科评议组召集人,中国机械工程学会副理事长,中国机械制造工艺协会副理事长,国家973计划项目“超高速切削及其装备”首席科学家,国家重大科技专项“高档数控机床及基础制造装备”技术负责人,国家自然科学基金重大研究计划“纳米制造基础研究”指导专家组组长,快速制造国家工程研究中心负责人。长期从事先进制造技术方面的研究及增材制造、微纳制造、生物制造等技术与装备的科研和教学工作,是中国增材制造技术的开拓者之一,先后主持“九五”、“十五”国家重点科技攻关项目及国家自然科学基金、国家863和国家973项目等20余项,获得国家科技进步二等奖1项,国家技术发明二等奖1项,获得省部级一等奖3项,2001年获全国五一劳动奖章,全球华人蒋氏科技成就奖,授权国家发明专利40余项,发表论文300余篇。

李涤尘(1964-) 男,重庆南岸人,西安交通大学机械工程学院长江学者特聘教授,博士生导师,机械制造系统工程国家重点实验室主任,兼任中国机械工程学会特种加工分会增材制造技术委员会主任、摩擦学分会人工关节与内植物委员会副主任,《Virtual & Physical Prototyping》、《Biofabrication》和《Journal of Bionic Engineering》国际期刊编委。2004年获得第8届中国青年科技奖,2007年入选国家新世纪百千万工程计划。主要从事制造工艺与装备、快速成形制造技术和生物制造等方面研究。获得国家科技进步二等奖1项,省部级一等奖3项;授权国家发明专利60余项;发表论文400余篇,其中国际期刊100余篇。

0 概述

增材制造(additive manufacturing, 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。自 20 世纪 80 年代末增材制造技术逐步发展,期间也被称为“材料累加制造”(material increase manufacturing)、“快速原型”(rapid prototyping)、“分层制造”(layered manufacturing)、“实体自由制造”(solid free-form fabrication)、“3D 打印技术”(3D printing)等。名称各异叫法分别从不同侧面表达了该制造技术的特点。

美国材料与试验协会(ASTM) F42 国际委员会对增材制造和 3D 打印有明确的概念定义。增材制造是依据三维 CAD 数据将材料连接制作物体的过程。相对于减法制造它通常是逐层累加过程。3D 打印是指采用打印头、喷嘴或其他打印技术沉积材料来制造物体的技术。3D 打印也常用来表示“增材制造”技术,在特指设备时,3D 打印是指相对价格或总体功能低端的增材制造设备。

从广义的原理来看,以设计数据为基础,将材料(包括液体、粉材、线材或块材等)自动化地累加起来成为实体结构的制造方法,都可视为增材制造技术。

增材制造技术不需要传统的刀具、夹具及多道加工工序,利用三维设计数据在一台设备上可快速而精确地制造出任意复杂形状的零件,从而实现“自由制造”,解决许多过去难以制造的复杂结构零件的成形,并大大减少了加工工序,缩短了加工周期。而且越是复杂结构的产品,其制造的速度作用越显著。近年来,增材制造技术取得了快速的发展。增材制造原理与不同的材料和工艺结合形成了许多增材制造设备。目前已有的设备种类达到 20 多种。该技术一出现就取得了快速的发展,在各个领域都取得了广泛的应用,如在消费电子产品、汽车、航空航天、医疗、军工、地理信息、艺术设计等。增材制造的特点是单件或小批量的快速制造,这一技术特点决定了增材制造在产品创新中具有显著的作用。美国《时代》周刊将增材制造列为“美国十大增长最快的工业”,英国《经济学人》杂志则认为它将“与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命”,认为该技术改变未来生产与生活模式,实现社会化制造,每个人都可以成为一个工厂,它将改变制造商品的方式,并改变世界的经济格局,进而改变人类的生活方式。

美国专门从事增材制造技术咨询服务的 Wohlers 协会在 2013 年度报告中对行业发展情况进行了分析。2012 年增材制造设备与服务全球直接产值 22.04 亿美元,2012 年增长率为 28.6%,其中,设备材料:10.03 亿美元,增长 20.3%,服务产值:12 亿美元,增长 36.6%,其发展特点是服务相对设备材料,增长更快。在增材制造应用方面,消费商品和电子领域仍占主导地位,但是比例从 23.7%降低到 21.8%;机动车领域从 19.1%降低到 18.6%;研究机构为 6.8%;医学和牙科领域从 13.6%增加到 16.4%;工业设备领域为 13.4%;航空航天领域从 9.9%增加

到 10.2%。在过去的几年中,航空器制造和医学应用是增长最快的应用领域。目前美国在设备的拥有量上占全球的 38%,中国继日本和德国之后,以约 9%的数量占第四位。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%。

1 国际发展状况

国际上增材制造经过 20 多年的发展,美国已经成为增材制造领先的国家,3D 打印技术不断融入人们的生活,在食品、服装、家具、医疗、建筑、教育等领域大量应用,催生许多新的产业。增材制造设备已经从制造业设备成为生活中的创造工具。人们可以用 3D 打印技术自己设计的物品,使得创造越来越容易,人们可以自由地开展创造活动。创造活力成为引领社会发展的热点。增材制造技术正在快速改变传统的生产方式和生活方式,欧美等发达国家和新兴经济国家将其作为战略性新兴产业,纷纷制定发展战略,投入资金,加大研发力量和推进产业化。

美国奥巴马总统在 2012 年 3 月 9 日提出发展美国振兴制造业计划,向美国国会提出“制造创新国家网络”(NNMI),其目的在夺回制造业霸主地位,要以一半的时间和费用完成产品开发,实现在美国设计,在美国制造,使更多美国人返回工作岗位,构建持续发展的美国经济。为此,奥巴马政府启动首个项目“增材制造”,初期政府投资 3 000 万美元,企业配套 4 000 万元,由国防部牵头,制造企业、大学院校以及非盈利组织参加,研发新的增材制造技术与产品,使美国成为全球优秀的增材制造的中心,架起“基础研究与产品研发”之间的纽带。美国政府已经将增材制造技术作为国家制造业发展的首要战略任务给予支持。

2012 年的增材制造设备市场延续近年的发展好形势,销售数目和收入的增加让销售商从中获益,进一步推动了美国股票价格的增长。2012 年,增材制造技术通过主要出版物、电视节目甚至电影的方式涌入公众的视野。2012 年 4 月,在 Materialise 公司(比利时)的世界大会上,举办了一场时装秀,展出了快速成型制造的帽子和饰品。

据调查,价格低于 2 000 美元的设备多用于科学研究或个人,对行业产值影响不大。行业发展主要依赖于专业化设备性能的提高。目前,专业化设备主要销往美国市场。由于经济不景气隐藏的潜在客户被挖掘,并随着设计与制造的快速增长,快速成型制造行业也得以发展。在美国明尼苏达州明尼阿波利斯市举行的年度快速成型会议上,Materialise 公司(比利时)的创始人兼首席执行官 Wilfried Vancraen 因其对快速成型行业的广泛贡献被授予行业成就奖。增材制造技术发展呈现以下特点。

a) 增材制造产业不断壮大

在快速成型企业中正在进行公司间的合并,兼并的对象主要是设备供应商、服务供应商以及其他的相关公司。其中最引人注目的是 Z Corp. 公司被 3D System 公司收购,还有 Stratasys 公司计划与 Objet 公司合并。Delcam 公司(英国)收购了快速成型软件公司——Fabbify Software 公

司(德国)的一部分。据预计,Fabbify Software 会在 Delcam 公司的设计及制造软件里增添快速成型应用项。3D Systems 公司购买了参数化计算机辅助设计(CAD)软件公司 Alibre 公司,以实现计算机辅助设计(CAD)和3D打印的捆绑。2011年11月,EOS公司(德国)宣布该公司已经安装超过1000台的激光烧结成型机。11月初,3D system 公司在宣布收购 Huntsman 公司(德州,林地)与光敏聚合物及数字快速成型机相关的资产;随后又宣布兼并3D打印机制造商 Z Corp(马萨诸塞州,伯灵顿市),这次兼并花费了1.52亿美元。

b) 新材料新器件不断出现

Objet 公司发布了一种类 ABS 的数字材料以及一种名为 VeroClear 的清晰透明材料。3D Systems 公司也发布了一种名为 Accura CastPro 新材料,该种材料可用于制作熔模铸造模型。同期,Solidscape 公司(梅里马克,新罕布什州)也发布了一种可使蜡模铸造铸模更耐用的新型材料——plusCAST。2011年8月,Kelvin Global(新不列颠,康涅狄格州)宣布它们正在制作聚醚醚酮(PEEK)颅骨植入物。利用CT或MRI数据制作的光固化头骨模型可以协助医生进行术前规划,在制作规划的同时,加工PEEK材料植入物。据估计,这种方法会将手术时间降低85%。2011年6月,Optomec公司(新墨西哥州,阿尔伯克基)发布了一种可用于3D打印及保形电子的新型大面积气溶胶喷射打印头。Optomec公司虽以生产透镜设备而为快速成型行业所熟知,但它的气溶胶喷射打印却隶属于美国国防部高级研究计划局的介观综合保形电子(MICE)计划,该计划的研究成果主要应用在3D打印、太阳能电池以及显示设备领域。

c) 新市场产品不断涌现

2011年7月,Objet公司发布了一种新型打印机——Objet260 Connex,该种打印机可以构建更小体积的多材料模型。2011年7月,Stratasys公司发布了一种复合型快速成型机——Fortus250mc,该成型机可以将 ABSplus 材料与一种可溶性支撑材料的进行复合。Stratasys 公司还发布了一种适用于 Fortus400mc 及 900mc 的新型静态损耗材料——ABS-ESD7。2011年9月,Buldatron Systems 公司(纽约,纽约)宣布推出基于 RepRap 的 Buildaron1 3D 打印机。这种单一材料打印机既可以作为一种工具箱使用(售价1200美元),也作为组装系统使用(售价2000美元)。Objet 公司引入了一种新型生物相容性材料——MED610,这种材料适用于所有的 PolyJet 系统。刚性材料主要面向医疗及牙科市场。3D System 公司发布了一种基于覆膜传输成像的打印机——PROJET1500,同时也发布了一种从二进制信息到字节的3D触摸产品。2012年1月,MakerBot(布鲁克林,纽约)推出了售价1759美元的新机器 MakerBot Replicator,与它的前身相比,该机器可以打印更大体积的模型,并且第二个塑料挤出机的喷头可以更换,从而挤出更多颜色的 ABS 或 PLA。3D Systems 公司推出了一种名 Cube 的单材料、消费者导向型3D打印机,其售价低于1300美元。该机器装有无线连接装置,从而具有了从3D数字化设计库中下载3D模型的功能。国防部与 Stratasys 公司签订了100万美元的 uPrint3D 打印机

订单,以支持国防部的 DoD's STARBASE 计划,该计划的目的是吸引青少年对科学、技术、工程、数学以及先进制造技术中快速成型制造的兴趣。2012年2月,EasyClad 公司(法国)发布了 MAGIC LF600 大框架快速成型机,该成型机可构建大体积模型,并具有两个独立的5轴控制沉积头,从而可具有图案压印、修复及功能梯度材料沉积的功能。3D Systems 公司推出了一种可用于计算机辅助制造程序,如 Solidworks Pro / Engineer 的插件——Print3D。通过 3D Systems' ProParts 服务机构,这种插件可对零件及装配体进行动态的零件成本计算。2012年3月,Bumpy-Photo 公司(俄勒冈州,波兰市)正式推出了一款彩色3D打印的照片浮雕。先输入数字照片,再在24位色打印机 ZPrinter 上打印,就能形成3D照片浮雕。价格也从最初79美元的3D照片变为89美元的3D刻印图样。Stratasys 公司和 Optomec 公司展出了带有保形电子电路(利用的是 Optomec's Aerosol Jet 公司的技术)的熔化沉积打印的机翼结构。

d) 新标准不断更新

2011年7月,同期,美国试验材料学会(ASTM)的快速成型制造技术国际委员会 F42 发布了一种专门的快速成型制造文件(AMF)格式,新格式包含了材质、功能梯度材料、颜色、曲边三角形及其他的 STL 文件格式不支持的信息。10月份,美国试验材料学会国际(ASTM)与国际标准化组织(ISO)宣布,ASTM 国际委员会 F42 与 ISO 技术委员会 261 将在快速成型制造领域进行合作,该合作将降低重复劳动量。此外,ASTM F42 还发布了关于坐标系统与测试方法的标准术语。

2 我国增材制造技术的发展

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,在西安交通大学、华中科技大学、清华大学、北京隆源公司等典型的成形设备、软件、材料等方面研究和产业化方面获得了重大进展。随后国内许多高校和研究机构也开展了相关研究,如西北工业大学、北京航空航天大学、华南理工大学、南京航空航天大学、上海交通大学、大连理工大学、中北大学、中国工程物理研究院等单位都在做探索性的研究和应用工作。我国研发出了一批增材制造装备,在典型成形设备、软件、材料等方面研究和产业化方面获得了重大进展,到2000年初步实现的设备产业化,接近国外产品水平,改变了该类设备早期仰赖进口的局面。在国家 and 地方的支持下,在全国建立了20多个服务中心,设备用户遍布医疗、航空航天、汽车、军工、模具、电子电器、造船等行业。推动了我国制造技术的发展。近5年国内增材制造市场发展不大,主要还在工业领域应用,没有在消费品领域形成快速发展的市场。另一方面,研发方面投入不足,在产业化技术发展和应用方面落后于美国和欧洲。

近5年来,增材制造技术在美国取得了快速的发展。主要的引领要素是低成本3D打印设备社会化应用和金属零件直接制造技术在工业界的应用。我国金属零件直接制造技术也有达到国际领先水平的研究与应用,例如北京航空航天大学、西北工业大学和北京航空制造技术研究

所制造出大尺寸金属零件,并应用在新型飞机研制过程中,显著提高了飞机研制速度。

在技术研发方面,我国增材制造装备的部分技术水平与国外先进水平相当,但在关键器件、成形材料、智能化控制和应用范围等方面较国外先进水平落后。我国增材制造技术主要应用于模型制作,在高性能终端零部件直接制造方面还具有非常大的提升空间。例如:在增材的基础理论与成形微观机理研究方面,我国在一些局部点上开展了相关研究,但国外的研究更基础、系统和深入;在工艺技术研究方面,国外是基于理论基础的工艺控制,而我国则更多依赖于经验和反复的试验验证,导致我国增材制造工艺关键技术整体上落后于国外先进水平;材料的基础研究、材料的制备工艺以及产业化方面与国外相比存在相当大的差距;部分增材制造工艺装备国内都有研制,但在智能化程度与国外先进水平相比还有差距;我国大部分增材制造装备的核心元器件还主要依靠进口。

3 增材制造技术发展趋势

a) 难点与挑战

增材制造技术代表着生产模式和先进制造技术发展的趋势,产品生产将逐步从大规模制造向定制化制造发展,满足社会多样化需求。目前增材制造2012年直接产值约22亿美元,仅占全球制造业市场0.02%,但是其间接作用和未来前景难以估量。增材制造优势在于制造周期短、适合单件个性化需求、大型薄壁件制造、钛合金等难加工易热成形零件制造、结构复杂零件制造,在航空航天、医疗等领域,产品开发阶段,计算机外设发展和创新教育上具有广阔发展空间。

增材制造技术相对传统制造技术还面临许多新挑战和新问题。目前增材主要应用于产品研发,还存在使用成本高(10元/g~100元/g),制造效率低,例如金属材料成形为100g/h~3000g/h,制造精度尚不能令人满意。其工艺与装备研发尚不充分,尚未进入大规模工业应用。应该说目前增材制造技术是传统大批量制造技术的一个补充。任何技术都不是万能的,传统技术仍有强劲的生命力,增材制造应该与传统技术优选、集成,会形成新的发展增长点。对于增材制造技术需要加强研发,培育产业,扩大应用。通过形成协同创新的运行机制,积极研发、科学推进,使之从产品研发工具走向批量生产模式,技术引领应用市场发展,改变人们的生活。

b) 增材制造技术发展趋势

1) 向日常消费品制造方向发展。三维打印是国外近年来的发展热点。该设备称为三维打印机,将其作为计算机一个外部输出设备而应用。它可以直接将计算机中的三维图形输出为三维的彩色物体。在科学教育、工业造型、产品创意、工艺美术等有着广泛的应用前景和巨大的

商业价值。其发展方向是提高精度、降低成本、高性能材料发展。

2) 向功能零件制造发展。采用激光或电子束直接熔化金属粉,逐层堆积金属,形成金属直接成形技术。该技术可以直接制造复杂结构金属功能零件,制件力学性能可以达到锻件性能指标。进一步的发展方向是进一步提高精度和性能,同时向陶瓷零件的增材制造技术和复合材料的增材制造技术发展。

3) 向智能化装备发展。目前增材制造设备在软件功能和后处理方面还有许多问题需要优化。例如,成形过程中需要加支撑,软件智能化和自动化需要进一步提高;制造过程,工艺参数与材料的匹配性需要智能化;加工完成后的粉料或支撑的需要去除等问题。这些问题直接影响设备的使用和推广,设备智能化是走向普及的保证。

4) 向组织与结构一体化制造发展。实现从微观组织到宏观结构的可控制造。例如在制造复合材料时,将复合材料组织设计制造与外形结构设计制造同步完成,在微观到宏观尺度上实现同步制造,实现结构体的“设计—材料—制造”一体化。支撑生物组织制造、复合材料等复杂结构零件的制造,给制造技术带来革命性发展。

4 结语

增材制造以其制造原理的优势成为具有巨大发展潜力的制造技术。随着材料适用范围增大和制造精度的提高,增材制造技术将给制造技术带来革命性的发展。美国奇点大学(Singularity University)学术与创新中心副主席Vivek Wadhwa在华盛顿邮报上发表文章(2012年1月11日)“为何该轮到中国为制造业担忧?”(Why it's China's turn to worry about manufacturing)。他认为“新技术的出现很可能导致中国在未来20年中出现美国在过去20年所经历的空心化”,引领技术之一是以3D打印为代表的数字化制造。他认为今天简单的3D打印只能制作出相对粗糙的物体,这类设备正在快速发展,成本不断降低,功能不断提高,到2020年代中期,美国人能够在分子级别上制作精确的3D物体。“这样,中国还如何能与我们竞争”。他的观点或许值得我们借鉴,我们未来要在竞争中立于不败之地,我们今天就要毫不松懈的追赶和创造。

参考文献:

- [1] Wohlers Associates, Wohlers Report 2013 - Additive manufacturing and 3D printing state of the Industry Annual Worldwide Progress Report, 2013, USA

收稿日期:2013-06-24

欢迎投稿 欢迎刊登广告 欢迎订阅