

增材制造——创新与创业的利器*

Additive Manufacturing—Tool for Innovation and Entrepreneurship

西安交通大学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

李涤尘 苏 秦 卢秉恒



李涤尘

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增材制造(3D打印)技术专业委员会主任, 主要从事增材制造和生物制造方向的研究工作。发表论文400余篇, 获得国家发明专利70余项, 获得国家技术发明二等奖1项, 国家科技进步二等奖1项。

增材制造(Additive Manufacturing, AM)技术是通过CAD设计数据并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”的材料累加制造方法。自20世纪80年代末, 增材制造技术逐

增材制造可以快速、高效地实现新产品物理原型的制造, 为产品研发提供快捷技术途径。该技术降低了制造业的资金和人员技术门槛, 有助于催生小微制造服务业, 有效提高就业水平, 有助于激活社会智慧和资金资源, 实现制造业结构调整, 促进制造业由大变强。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.10.040

步发展, 期间也被称为“材料累加制造”、“快速原型”、“分层制造”、“实体自由制造”、“3D打印技术”等。美国材料与试验协会(ASTM)F42国际委员会对增材制造给出了定义: 增材制造是依据三维模型数据将材料连接制作物体的过程, 相对于减法制造, 它通常是逐层累加的过程。3D打印也常用来表示“增材制造”技术。狭义的3D喷印是指采用打印头、喷嘴或其他打印技术沉积材料来制造物体的技术, 这些增材制造设备相对价格较低, 总体功能较弱。

从更广义的原理上来看, 以三维CAD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, 均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。而且越是结构复杂的产品, 其制造的速度优势越明显。近20年来, 增材制造技术得到了快速的发展, 增材制造原理与不同的材料和工艺结合发展出了许多增材制造设备, 目前已达到20多个种类。这一技术在各个领域都获得了广泛的应用, 如电子产品、汽车、航空航天、医疗、军工、地理信息、艺术设计等。

增材制造(3D打印)技术被认为是“一项将要改变世界的技术”。英国《经济学人》杂志认为增材制造将“与其他数字化生产模式一起推动实现第三次工业革命”。2013年麦肯锡发布“展望2025”, 而增材制造被纳入决定未来经济的12大颠覆技术之一。增材制造技术为我国制造业发展和升级提供了历史性机遇。增材制造可以快速、高效地实现新产

* 国家自然科学基金项目(71371151)资助。

品物理原型的制造,为产品研发提供快捷技术途径。该技术降低了制造业的资金和人员技术门槛,有助于催生小微制造服务业,有效提高就业水平,有助于激活社会智慧和资金资源,实现制造业结构调整,促进制造业由大变强。

(1)为创新、创业开拓了巨大空间。3D打印适用于复杂形状结构、多品种、小批量的制造以及众多领域的应用。人们可以通过拓扑优化设计及多材料制造功能梯度结构,最大限度地发挥材料的功能,为许多装备设计和制造带来颠覆性进步,使设计摆脱了传统技术可制造性的约束,给创新设计释放了巨大的空间。

(2)崭新的生产组织模式为创业提供了无限商机。增材制造带来集散制造的崭新模式,即通过网络平台,实现个性化订单、创客设计、制造设备,乃至资金的集成规划与分散实施,这一生产模式可以有效实现社会资源的最大发挥,为全民创业和泛在制造提供技术支撑。

(3)促进学科交叉研究的革命性发展。发展微型冶金试验平台,应用于材料基因研究,创造新合金材料。可以通过细胞打印、组织工程,发展器官再造,通过建设干细胞试验台,快速、高效进行干细胞诱导试验,发展基因打印,为生命学科发展提供跃进式发展。

(4)为我国制造业发展和升级带来重大机遇。3D打印是产品创新的利器,已经成为先进开发模式。而生产能力过剩,产品开发能力严重不足,是我国制造业发展的瓶颈。将3D打印迅速在各个领域推广应用,是发展高技术的服务业,实现制造业结构调整和促进制造业由大变强的重要手段。

国内外发展现状及趋势

1 国外 3D 打印发展现状及趋势

经过近 30 年的发展,目前美国

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,催生出许多新的产业。人们可以用 3D 打印技术自己设计物品,使得创造越来越容易。美国为保持其技术领先地位,最早尝试将 3D 打印技术应用于航空航天等领域。1985 年,在五角大楼主导下,美国秘密开始了钛合金激光成形技术研究,直到 1992 年这项技术才公之于众。2002 年,美国宇航局(NASA)就研制出 3D 打印机,能制造金属零件。同年,美国将激光成形钛合金零件装上了战机。为提高制造效率,美国人开始采用 42kW 的电子束枪,Sciaky 的 3D 打印机每小时能打印 6.8~18.1kg 金属钛,而大多数竞争者仅能达到 2.3kg/h。美国军工巨头洛克希德·马丁公司宣布与 Sciaky 加强合作,用该公司生产的襟副翼翼梁装备正在生产的 F-35 战斗机。目前,使用 3D 打印钛合金零件的 F-35 已经进行了试飞。据估计,如果 3000 多架战机都使用该技术制造零部件,不仅大大提高“难产”的 F-35 战机的部署速度,而且还能节省数十亿美元成本,如原本相当于材料成本 1~2 倍的加工费现在只需原来的 10%;加工 1t 重的钛合金复杂结构件,传统工艺成本大约 2500 万元,而激光 3D 焊接快速成型技术的成本在 130 万元左右,仅是传统工艺的 5%。2012 年 7 月,美国太空网透露, NASA 正在测试新一代 3D 打印机,可以在绕地球飞行时制造设备零部件,并希望将其送到火星上。

世界科技强国和新兴国家都将增材制造技术作为未来产业发展新的增长点加以培育和支持,以抢占未来科技产业的制高点。2012 年,美国提出了“重振制造业”战略,将“增材制造”列为第一个启动项目,成立了国家增材制造研究院(NAMII)。欧盟国家认识到增材制造技术对工业乃至整个国家发展的重要作用及巨大潜力,纷纷加大支持力度。德国

政府在《高技术战略 2020》和《德国工业 4.0 战略计划实施建议》等纲领性文件中,明确支持包括激光增材制造在内的新一代革命性技术的研发与创新。澳大利亚政府倡导成立增材制造协同研究中心,促进以终端客户驱动的协作研究。新加坡政府在 2013 年财政预算案中宣布,将 5 亿美元的资金用于发展增材制造技术,让新加坡的制造企业能够拥有全球最先进的增材制造技术。日本政府在 2014 年预算案中划拨了 40 亿日元,由经济产业省组织实施以增材制造技术为核心的制造革命计划,以构建其完备的增材制造材料与装备体系,提高其增材制造技术的国际竞争能力。2014 年 6 月,韩国政府宣布成立 3D 打印工业发展委员会,批准了一份旨在使韩国在 3D 打印领域获得领先地位的总体规划,其目标包括到 2020 年培养 1000 万创客(Maker),针对各个层次的民众制订相应的 3D 打印培训课程,以及为贫困人口提供相应的数字化基础设施。可以说,增材制造技术正在带动新一轮的世界科技和产业发展与竞争。

美国专门从事增材制造技术咨询服务的 Wohlers 协会在 2015 年度报告中对行业发展情况进行了分析^[1]。2014 年增材制造设备与服务全球直接产值为 41.03 亿美元,2014 年增长率为 35.2%,其中设备材料为 19.97 亿美元,增长 31.6%;服务产值为 21.05 亿美元,增长 38.9%;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,工业和商业设备领域占据了主导地位,然而其比例从 18.5% 降低到 17.5%;消费商品和电子领域所占比例为 16.6%;航空航天领域从 12.3% 增加到 14.8%;机动车领域为 16.1%;研究机构占 8.2%,政府和军事领域占 6.6%,二者较 2013 年均有所增加;医学和牙科领域占 13.1%。在过去 10 年的大部分时间内,消费商品和电子领域始终

占据着主导地位。目前,美国在设备拥有量上占全球的 38.1%,居首位;日本占第二位;中国于 2014 年赶超德国,以 9.2% 列第三位。在设备销售量方面,2014 年度美国增材制造设备产量最高,中国次之,日本和德国分别位居第三和第四位。

2 国内 3D 打印发展现状

自 20 世纪 90 年代初,在国家科技部等多部门持续支持下,西安交通大学、华中科技大学、清华大学、北京隆源公司等人在典型成形设备、软件、材料等方面的研究和产业化获得了重大进展^[2]。随后国内许多高校和研究机构也开展了相关研究,到 2000 年初步实现了设备产业化,并接近国外产品水平,改变了该类设备早期依赖进口的局面。在国家和地方的支持下,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。但是,我国 3D 打印技术主要应用在工业领域,没有在消费品领域形成市场;在产业化技术发展和应用方面落后于美国和欧洲;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为落后。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,我国只开展了一些局部相关研究,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、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,但在智能化程度方面与国外先进水平

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。在市场化普及方面,国民的技术认知度低,大部分人不了解这一技术和作用。我国在增材制造产业上没有形成系统的产业链。增材制造技术涉及前端的三维 CAD 设计、新材料和下游的应用技术等,这些领域的研发缺失很大,企业应用程度低。这些因素导致我国难以形成强有力的产业化发展,另一反面也制约了创新能力的提升。

近 5 年来,增材制造技术在美国和我国取得了快速的发展,主要的引领要素是低成本增材制造设备社会化应用、金属零件直接制造技术在工业界的应用、基于增材制造的各种生物材料及生物学结构的制造技术等。我国金属零件直接制造技术的研究与应用已达到国际领先水平,例如北京航空航天大学、西北工业大学和北京航空制造工程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。北京航空航天大学王华明教授以此方面的研究与应用获得 2012 年国家技术发明一等奖。华中科技大学史玉升教授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。西安交通大学李涤尘教授以个性化颅颌面骨替代物设计制造技术及应用获得 2104 年国家技术发明二等奖。

增材制造技术代表着生产模式和先进制造技术发展的一种趋势,即产品生产将逐步从大规模制造向个性化制造发展,以满足社会多样化需求。虽然增材制造目前仅占全球制造业市场 0.02%,但其间接作用和未来前景难以估量。增材制造的优势是制造周期短、适合单件个性化制造,可实现大型薄壁件、钛合金等难加工易热成形零件、结构复杂零件制造。该技术与设备在航空航天、医疗等领域,在产品开发、计算机外设和

创新教育上具有广阔发展空间^[3]。

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(10~100 元/g)、制造效率低的问题,如金属材料成形为 100~3000g/h,制造精度不能令人满意。另外,其工艺与装备研发还不充分,尚未进行大规模工业应用。增材制造应与传统技术优选、集成,形成新的增长点,并加强研发、产业培育,扩大应用,通过形成协同创新的运行机制,积极科学推进,使之从产品研发工具走向批量生产模式,以技术引领应用市场发展,改变人们的生活。

增材制造技术经过二三十年的探索、研究和改进,目前正处于承上启下的发展阶段,一方面期待新的技术突破,提高增材制造在材料、精度和效率上的要求;另一方面则是基于现有技术的新应用,扩宽增材制造技术的应用范围和应用方式。前者可能的发展方向是具有高效、并行、多轴、集成等特征的新型增材制造技术;而后的应用范围有生物、医疗、航空航天、汽车、建筑、雕塑、教育,甚至是人们的日常生活,这些新兴应用领域的扩展,将使增材制造技术与装备由通用型向专用型发展,如细胞三维打印技术与装备、组织工程支架三维打印技术与装备等。

存在问题

技术的进步将不断启发人们开发新的业务和应用,不断开发和引导人们的潜在需求。产业内的企业在进行一项创新活动的计划时,首先考虑市场是否有巨大的需求潜力。这个过程包括选择适当的经营领域(即选择环境),同时也包括对自身技术水平的思考,以满足新产品和市场需求。3D 打印技术产业化推进过程中遇到的主要问题是:

(1) 产学研用错位竞争,严重脱离,没有形成有效的创新产业链。

3D 打印技术是一项新兴技术,在其向新兴产业转化的过程中,现在仍是以技术研发推动为主,市场需求拉动下的应用研发为辅,其技术研发仍是重中之重。企业不可能将基础研究与共性技术研发作为自己的发展领域,而现在高校与科研单位更多的是与企业联合共同开发 3D 打印技术,整个 3D 打印技术的产学研模式需要确立,谁主导基础科学,谁主导共性技术,谁主导应用研究都需要政府深思熟虑,以营造一个良好发展的产学研创新体系。

(2) 3D 产业链发展不均衡。3D 打印产业链涉及上、中、下游很多项技术和产业,但就目前而言,主要在航空航天、汽车、生物医药等产业开始应用,其他诸如新材料、软件行业、控制技术、激光器和扫描技术、文化创意等都还未形成产业雏形,这将制约 3D 打印全产业链的推进。如果对于其他薄弱的环节进行有意识的引进、融合,那么将有助于 3D 打印产业化的实施。

(3) 政府的政策、制度等配套保障体系不完善。建设一条完整 3D 打印产业链需要一个良好的社会环境来保障,而这个保障者就是政府。政府通过对创新产生、扩散和利用等活动的推动作用来促进整个产业创新发展,创新系统一方面需要产学研各创新主体的交互作用;另一方面需要政府、中介、金融等部门的联动效应。国家还需要对其政策保障体系进行完善,投入资金用于共性技术研发,需要完善和落实供给侧政策的同时也要开始考虑需求侧政策,如是否要加大对知识产权、安全隐私的保护措施,是否健全监管制度体系,进一步加强监管机构中、财、物的投入,积极调动各方形成监管合力等。

关键技术

(1) 智能化增材制造装备。增材制造装备是高端制造装备重点方

向,在增材制造产业链中居于核心地位。增材制造装备制造包括制造工艺、核心元器件和技术标准及智能化系统集成。面向装备发展需求,应重点研究装备的系统集成和智能化,包括:多材料、多结构、多工艺增材制造装备;增材制造数据规范与软件系统平台;材料工艺数据库建设与装备的智能控制;增材制造装备关键零部件及系统集成技术。

(2) 增材制造材料工艺与质量控制。增材制造的材料累积过程对构件成形质量有重要影响,主要体现在零件性能和几何精度上。为保证制造质量,需要不断研发面向增材制造的新材料体系;通过材料、工艺、检测、控制等多学科交叉,提升制件质量。研究内容包括:面向增材制造的新材料体系;金属构件成形质量与智能化工艺控制;难加工材料的增材制造成形工艺;增材制造材料工艺的质量评价标准。

(3) 功能驱动的材料与结构一体化设计。增材制造因其降维和逐点堆积材料的原理,给设计理论带来了新的发展机遇。一方面突破了传统制造约束的设计理念,为结构自由设计提供可能,另一方面超越传统均质材料的设计理念,为功能驱动的多材料、多色彩和多结构一体化设计提供新方向。研究内容包括:功能需求驱动的宏微结构一体化设计;多材料、多色彩的结构设计方法与智能化制造工艺集成;面向增材制造工艺的设计软件系统。

(4) 生物制造。增材制造技术与生物医学结合形成了新的学科方向——生物制造(Biofabrication)。它是制造、材料、信息和生命科学的交叉融合,目标是为生物组织从细胞和生物材料向有形大结构组织和器官发展提供结构载体;研发定制化组织器官及其替代物,发展新兴产业,为人类健康服务。重点研究包括:个性化人体组织替代物及其临床应

用;人体器官组织打印及其与宿主组织融合;体外生命体组织仿生模型的设计与细胞打印。

(5) 云制造环境下的增材制造生产模式。发挥并利用全社会智力和生产资源是未来社会形态变革的方向,增材制造正是促进这一社会模式形成的技术动力。新一代生产模式趋向于集散制造发展,实现工艺、数据、报价统一,形成众创、众包、众筹的运作方式。因此,需要技术和管理的集成创新,需要开展制造学科与管理学交叉融合的研究与应用实践。主要研究包括:增材制造技术与传统制造工艺的技术集成;增材制造服务业对社会化生产组织模式变化的影响;效益驱动的分散增材制造资源与传统制造系统的动态配置;分散社会智力资源和增材制造资源的快速集成。

结束语

增材制造技术正在成为一项对未来科技和产业发展具有重要影响的技术。党和国家要求对 3D 打印必须高度重视,密切跟踪,迎头赶上,要紧紧抓住和用好新一轮科技革命和产业变革的机遇,不能等待,不能懈怠,抓紧实现产业化。需要从战略高度认识将 3D 打印作为一项重大的、标志性的新兴产业重点培育,在政策、资金、人才等多方面给予支持,促进创新和创业发展,为我国制造业的转型提供创新的利器。

参考文献

- [1] Wohlers T, Caffrey T. Annual worldwide progress report of additive manufacturing and 3D printing state of the industry. USA: Wohlers Associates, 2015.
- [2] 李涤尘,田小永,王永信,等.增材制造技术的发展.电加工与模具,2012(S1):20-22.
- [3] 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.机械工程学报,2013(6):129-135.

(责编 谷雨)