

孙健峰,朱卿创,杨 洲,等. 增材制造技术在农业机械制造中的应用[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):408-411.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.06.121

增材制造技术在农业机械制造中的应用

孙健峰,朱卿创,杨 洲,黄忠奎

(华南农业大学工程学院,广东广州 510642)

摘要:介绍目前增材制造技术的研究现状和基本原理,分析我国农机研发的特点,阐述光固化成型技术、选区激光烧结技术、直接金属激光烧结技术、熔融沉积技术在农业机械制造中的应用。采用熔融沉积技术制备全新外槽轮排肥器,搭建基于电子施肥控制器控制的施肥试验平台。试验数据表明,基于熔融沉积的外槽轮排肥器的变异系数低于传统排肥器。增材制造技术将改变传统农业机械设计的流程和思路,提高农业机械的可靠性和服役时间,促进农业机械制造水平的提高。

关键词:增材制造;3D 打印;农业机械;应用

中图分类号: TH164;S23 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)06-0408-04

增材制造(additive manufacturing)是以三维数据为基础,由 CAD 模型驱动的一种制造方法,其特点是采用“加法”成型,通过先离散后叠加的思想成型零件^[1]。随着科学技术的发展及《中国制造 2025》的提出,采用增材制造方法成型零件越来越受到人们的关注^[2]。增材制造技术生产柔性大,加工响应时间短,单件小批量生产中无需开模,设计制造一体化集成度高,

可直接成型零件,成型中不受传统加工方法中夹持、切削方式的约束,可加工高脆性、高熔点、高硬度的材料,《经济学人》杂志认为,该技术将引起第 3 次工业革命。目前,增材制造技术已被广泛应用于航空航天、汽车、医疗、模具、建筑等行业^[3-4]。

1 增材制造技术的研究现状

美国于 2012 年启动并投资 10 亿美元资助包括增材制造在内的振兴美国制造计划,建立了 ASTM F2792-12a^[5]、ASTM F2915-12^[6]、ASTM F2912-11^[7]、ASTM F2924-12a^[8]等一系列增材制造技术标准。英国于 2011 年开始增加增材制造研发经费的投入,并在拉夫堡大学、诺丁汉大学、谢菲尔德大学、埃克塞特大学、曼彻斯特大学等相继建立了增材制造研究中心。澳大利亚于 2012 年 2 月启动了“微型发动机增材制造技术”项目,该项目使用增材制造技术制造航空微型发动机零部件,对增材制造技术在航空航天的应用起到推

收稿日期:2016-01-28

基金项目:国家自然科学基金(编号:51505157);广东省自然科学基金(编号:2014A030313460、2015A030310330);广东省科技计划(编号:2013B020501002)。

作者简介:孙健峰(1983—),男,吉林长春人,博士,讲师,主要从事农业机械化研究。E-mail:sunjianfeng@scau.edu.cn。

通信作者:杨 洲,博士,教授,主要从事农业机械化研究。E-mail:yangzhou@scau.edu.cn。

受到抑制。葡萄愈伤组织中白藜芦醇含量随着紫外线照射时间的延长呈现先上升随后又逐渐下降的趋势。其中,光照 3 min 后茎段与叶片来源的愈伤组织白藜芦醇含量最高,光照 5 min 后叶柄白藜芦醇含量最高。但紫外光照超过 15 min,愈伤组织中的白藜芦醇积累则会受到抑制。外植体的差异也会造成愈伤组织中白藜芦醇含量不同,其中含量从高到低依次为叶片>茎段>叶柄,但无显著差异。染菌处理可以显著提高愈伤组织中白藜芦醇的含量。

参考文献:

- [1]郭景南,刘崇怀,潘 兴,等. 葡萄属植物白藜芦醇研究进展[J]. 果树学报,2002,19(3):199-204.
- [2]张贵娟,杨 涛,罗非君,等. 白藜芦醇的提取与检测方法研究进展[J]. 食品与机械,2013,29(2):234-237.
- [3]韩晶晶,刘 炜,毕玉平. 白藜芦醇的研究进展[J]. 生物工程学报,2008,24(11):1851-1859.
- [4]张 真,李 胜,刘 媛,等. 硝酸银对葡萄愈伤组织生长及其白藜芦醇含量的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2008,43(5):59-62.
- [5]区炳庆,何丽兰. 香蕉组培苗 POD、PPO 及 SOD 活性对银胁迫的

反应[J]. 广西植物,2003,23(1):93-95,89.

- [6]Akiyama T, Shibuya M, Liu H M, et al. p - Coumaroyltriacetic acid synthase, a new homologue of chalcone synthase, from *Hydrangea macrophylla* var. *thunbergii* [J]. European Journal of Biochemistry/FEBS, 1999, 263(3):834-839.
- [7]Tropf S, Karcher B, Schrodre G, et al. Reaction mechanisms of homodimeric plant polyketidesynthases(stilbene and chalcone synthase) [J]. Journal of Biological Chemistry, 1995, 270(14):7922-7928.
- [8]Fritzeimer K H, Kindl H. Coordinate induction by UV light of stilbene synthase, phenylalanine ammonia-lyase and cinnamate 4-hydroxylase in leaves of vitaceae[J]. Planta, 1981, 151(1):48-52.
- [9]Borie B, Jeandet P, Parize A, et al. Resveratrol and stilbene synthase mRNA production in grapevine leaves treated with biotic and abiotic phytoalexin elicitors [J]. American Journal of Enology and Viticulture, 2004, 55(1):60-64.
- [10]Bavaresco L, Petegolli D, Cantu E, et al. Elicitation and accumulation of stilbene phytoalexins in grapevine berries infected by *Botrytis cinerea* [J]. Vitis, 1997, 36(2):77-83.
- [11]文 涛,曾 杨,喻 晓,等. 真菌诱导子对虎杖愈伤组织中白藜芦醇合成的影响[J]. 核农学报,2008,22(4):435-438,419.

动作用。日本通过优惠政策和大量资金鼓励产学研用紧密结合,促进增材制造技术在日本的发展^[4]。

我国于 2012 年成立了 3D 打印技术联盟(增材制造),于 2015 年成立了中国工程学会增材制造(3D 打印)分会,参与的主要科研机构有清华大学、北京航空航天大学、华中科技大学、华南理工大学、西北工业大学、西安交通大学等。3D 打印产业联盟和增材制造分会的成立有利于尽快建立行业标准,加强行业与行业、行业与政府以及国际间的广泛交流^[4]。

2 增材制造的基本原理

增材制造是将三维零件先离散后堆积的一种加工方法,其成型过程主要是通过被加工材料受到外界不同环境的影响(如受热、受光)而发生物理或化学变化来实现的^[9-11],制造过程如下:(1)设计(三维制图软件)或通过逆向工程(三维扫描)等获得所要加工产品的计算机三维模型。(2)根据工艺要求,将所建立的模型按一定规律在计算机中离散化,该过程也叫切片或分层,将原来的三维数据转换为平面数据。(3)将离散后的平面数据按一定规律进行累加成型,获得实体零件。其原理见图 1。

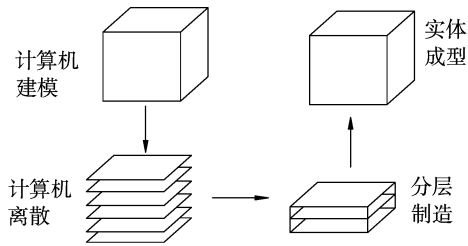


图1 增材制造原理示意

3 农业机械研发的特点

3.1 农业机械特点

由于农用机械受作物生长条件的约束,所有农业机械均须进行田间试验验证。种植机械、植保机械、收获机械均受到田间试验季节的影响,每年的试验时间是固定的,错过试验时间只能等待下一年,因此农业机械的研究周期较长。农业机械还受到作业过程中因素差异的影响,我国幅员辽阔,每个省的农作物和农艺均有明显差别,同一作物在不同区域的农艺也不完全相同,使得农业机械研发具有种类繁多、通用性差、研发面广、研发成本高等特点^[12]。

3.2 农作物特点

与工业相比,农业作物有其自身的特点。农业作物的研究对象多为生物,种类繁多、个体差异明显、性能差异大、物料规律性不强,多数生物受外界条件影响较大,不同降水量、施肥量可使同一作物在不同收获年表现出差异。以柑橘为例,古语有“南橘北枳”的说法。

3.3 农业机械市场特点

中国农业机械市场已经成为中国机械行业的热点市场,农业已成为高回报率产业。从欧美、日韩等农业发达国家引进的农机不能完全适应我国农业的需要,这些差异导致农机研制具有复杂性和周期性^[13]。目前,农业、农机的投资一直是资本市场中投资的热点,但国内的农机企业高端技术研发能力较弱,国际农机巨头相继在中国设厂,争相占领中国市

场,导致我国农机市场的高端领域被国外农机行业占领;中低端领域,尤其是低端领域的小农机企业较多,恶性竞争严重,一味追求价格低廉导致产品质量不过关、农机使用服役时间短、市场认可度低。尽快提高农机的使用稳定性和服役时间、尽快争夺高端农机市场已成为亟待解决的问题^[14-15]。

4 典型增材制造技术在农机制造中的应用

4.1 光固化成型技术(stereo lithography apparatus,SLA)

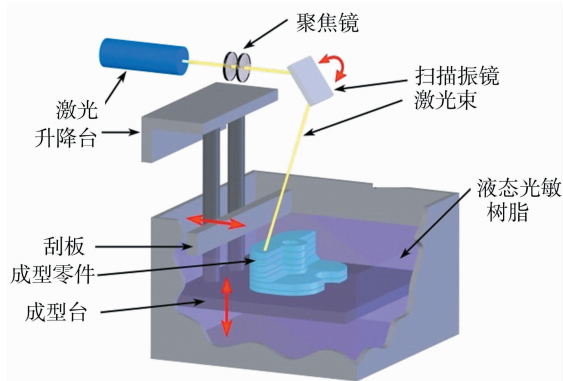
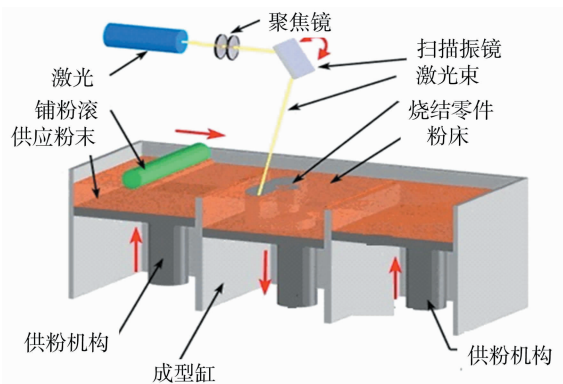
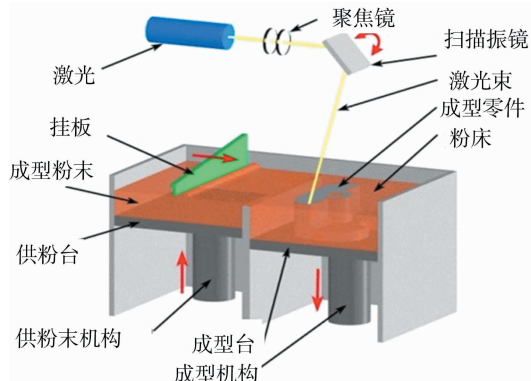
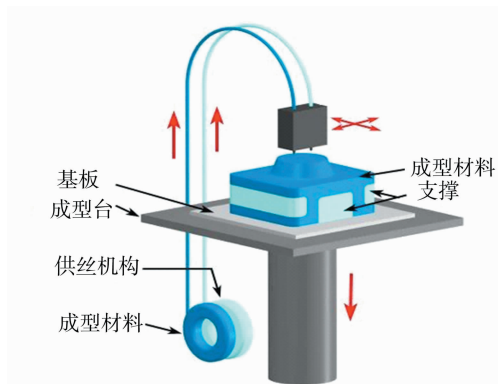
光固化成型是由 Charles W. Hull 于 1984 年获得的美国专利,1998 年美国 3D System 公司推出 SLA-250 商品产品,是目前最成熟的增材制造技术之一。光固化成型技术可获得形状复杂、表面质量较好的零件^[16-18]。光固化成型工艺的原理见图 2,在紫外激光束控制单元的驱动下,将零件的各分层信息在光敏树脂表面加工,被扫描区域的光敏树脂材料因紫外光照射发生聚合反应而固化,形成零件的 1 个切片层;一层固化后,工作台向下移动 1 个层厚的距离,新一层的液态树脂填充加工表面,采用刮板将液面刮平,进行下一层的扫描加工,如此反复直到整个零件制造完成^[18]。由于 SLA 设备昂贵,光敏树脂价格较高,国产价格约为 1 000 元/kg,导致 SLA 技术在农业机械中的应用不广泛,仅少数科研单位采用 SLA 技术设计、制造全新农业机械部件并进行相关田间试验,如华南农业大学罗锡文院士团队采用 SLA 技术成型播种机中的排种器和水田激光平地机中的控制盒等。

4.2 选区激光烧结技术(selective laser sintering,SLS)

选区激光烧结技术由美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Carl Deckard 于 1989 年申请专利,并于 1992 年由 DTM 公司开发了首款商业设备^[19-20]。SLS 最大的特点是可以成型金属零件,成型材料采用的是外表包裹聚合物的金属粉末。SLS 原理见图 3,粉末首先被均匀置于成型平台上,激光通过扫描振镜按照切片层数据将加工区域内的粉末加热,粉末因聚合物受热而粘结在一起;单层加工完成后,成型台下降 1 个层厚,铺粉机构将新的粉末重新预置于加工区域之上,激光再次开始加工,重复以上过程直至零件加工完成。成型后的零件须置于高温保温炉中进行保温,将聚合物黏合剂熔化。目前该技术在模具行业应用广泛,选用型砂进行激光烧结,完成砂型铸造,制备模具。选区激光烧结在农机方面有较多应用,如滤水器中的过滤器。过滤器由 5 层丝网组成,分别是保护层、过滤控制层、分散层、支撑骨架层、骨架层,每层均由多个尺寸较小的孔洞组成。由于受到加工路径和刀具尺寸的约束,采用传统成型方法很难成型,而采用 SLS 技术可十分方便地成型多孔滤网。

4.3 直接金属激光烧结(direct metal laser sintering,DMLS)技术

直接金属激光烧结技术由 RPI(Rapid Product Innovations)和德国 EOS 公司的 GmbH 于 1994 年共同研发,是首个商业化的直接生产金属零件的成型方法^[21]。直接金属激光烧结技术的原理见图 4,与 SLS 十分相似,DMLS 多采用两缸结构。与 SLS 相比,DMLS 选用的金属粉末尺寸更小(一般直径为 20 μm),粉末无需黏结剂或助熔剂,无需后续加热和渗透处理,铺粉厚度更薄,成型零件形状更加复杂,获得成型零件的致密度更高(一般致密度高于 95%)。目前可成型材料

图2 光固化成型原理示意^[16]图3 激光选区烧结示意^[20]图4 直接金属激光烧结示意^[21]图5 熔融沉积成型原理示意^[23]

主要有合金钢、不锈钢、工具钢、铝、青铜、钴铬、钛等,主要应用领域有快速模具、医疗植入物、高温应用、航空航天零部件^[19]。目前,DMLS 在农业上主要应用于形状复杂、曲面较多的零件,如旋耕刀、水泵叶轮机、送料螺旋等。随着农业航空植保技术在农业中的应用不断增加,农业航空中无人机的关键部件对于轻量化的极限需求与日俱增,这将为 DMLS 在农业航空提供新的研究领域。

4.4 熔融沉积成型技术 (fused deposition modeling, FDM)

熔融沉积成型是由美国 Stratasys 公司开发的继光固化成型工艺后另一种被广泛应用的成型方法^[22-23]。其原理见图 5,将丝状的热熔性材料加热熔化,通过微细喷嘴将熔融丝挤出,喷嘴按照控制单元指令相对工作台沿水平方向移动,熔融丝挤出温度略高于固化温度,以保证热熔材料的黏结性,与前一层熔结在一起。一层成型后,工作台按设定值下降 1 个层厚,继续熔喷沉积,直至整个实体完成。目前,新的熔融沉积采用双喷头或多喷头,双喷头是将支撑与实体分开成型,可分别控制支撑和实体的成型参数。熔融沉积是目前成本最低廉、应用最广泛的增材制造方法,主要用于办公用品、模具开发、医学植入体、医疗器械、建筑等三维实体制造^[24]。

华南农业大学杨洲团队采用熔融沉积设计并制造了全新外槽轮排肥器的排肥轮(图 6)。图 6 中红色部分为采用熔融沉积成型的外槽轮排肥器的外槽轮及其联轴器,米白色部分为目前市场上通用的外槽轮。杨洲团队通过步进电机控制每个外槽轮,并对 2 种外槽轮的排肥量进行了对比研究。试验选用华南农业大学自行搭建的排肥检测平台(图 7),采用电子施肥控制器控制直流电机转速,采用 HX-T 型电子天平测



图6 外槽轮排肥器

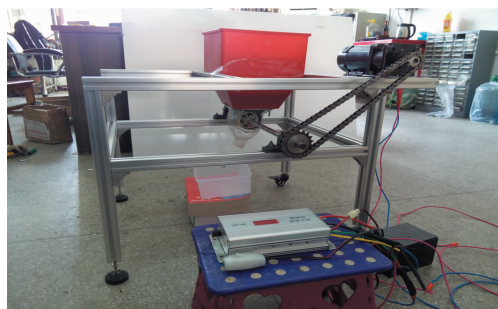


图7 外槽轮排肥试验平台

量排肥质量,以外槽轮旋转 10 圈为 1 个指标,连续测量 5 次,试验数据见表 1。数据表明,采用增材制造的外槽轮排肥器变异系数更小,设备更加稳定可靠。

5 增材制造技术应用于农机机械制造的前景

发展增材制造技术可为农机发展开拓设计思路,减少无用的消耗。增材制造技术目前已被应用于多个行业,在农

表 1 试验数据

机械	排肥质量(g)							变异系数 (%)
	试验 1	试验 2	试验 3	试验 4	试验 5	平均值	标准差	
原排肥器	615	630	588	625	619	615.4	14.62	2.38
增材制造排肥器	406	407	410	422	422	413.4	7.14	1.73

业机械制造中的应用也势在必行。传统的农机设计流程复杂,包括确定设计目标和方案、设计样机、田间试验、优化设计、完成开发。传统农机设计中首先要考虑加工,在能够实现加工的基础上进行设计,导致在理论中最省功的仿生(仿形)设计无法在实际生产中实现。增材制造最大的优势在于突破传统设计思路,采用层层叠加的方式,加工过程中几乎不考虑走刀路线等加工约束,特别适于加工形状复杂的空间渐变曲线、仿生(仿形)结构。采用增材制造可为农机设计提供新的思路,将有更多的仿生(仿形)结构得以应用,大幅减少农机的功耗损失。

发展增材制造技术可缩短农业机械试制周期,减少成本投入。农业机械与其他机械最大的区别在于农机需要田间试验,而田间试验又受到作物生长周期的限制,因此样机试验效果的反馈成为缩短农机研发周期的瓶颈,许多农机需用几年时间完成田间试验。增材制造技术最大的优势在于田间试验效果的快速反馈,小尺寸关键部件的成型时间一般为 1~2 d,自动化程度高,几乎不需要人为操作,成型单件成品时间远远少于传统加工。相同时间内可反复多次进行田间试验及设计修改,提高了优化效率,缩短了农机的试制周期,使田间试验与设计修改结合得更紧密,效率更高,减少了产品的市场响应时间和研发成本。发展增材制造技术可提高农机制造水平,增加农机设备的可靠性。农机多采用传统的车钳铣刨磨进行加工,制造成本低,精度和稳定性差,虽然国家每年都有农机补贴,但农机使用寿命过短造成了资源的极大浪费。增材制造属于先进制造技术,将数控机床与计算机相结合,加工精度和自动化程度高,成型过程中受外界干扰条件少,成型零件性能稳定可靠,是《中国制造 2025》重点发展方向之一。采用增材制造技术将大幅提高我国农机制造行业的制造水平,增加农机装备的可靠性,提升我国农业机械制造行业的竞争力。

参考文献:

- [1] 闵杰,李佳师. 3D 打印带动变革 国内应用尚未起步[N]. 中国电子,2012-07-24(1).
- [2] Sun J F, Yang Y Q, Wang D. Mechanical properties of a Ti6Al4V porous structure produced by selective laser melting[J]. Materials & Design, 2013, 49: 545-552.
- [3] Wang S, Song C, Yang Y. Rapid manufacturing technology of digital dental restorations and its progress[J]. Materials Research and Application, 2012, 6(2): 91-95.
- [4] 孙健峰. 激光选区熔化 Ti6Al4V 可控多孔结构制备及机理研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [5] ASTM F2792-12a[EB/OL]. (2013-01-10)[2015-12-10]. <http://www.astm.org/Standards/F2792.htm>.
- [6] ASTM F2915-12[EB/OL]. (2013-01-10)[2015-12-10]. <http://www.astm.org/Standards/F2915.htm>.

- [7] ASTM F2921-11[EB/OL]. (2013-01-10)[2015-12-10]. <http://www.astm.org/Standards/F2921.htm>.
- [8] ASTM F2924-12a[EB/OL]. (2013-01-10)[2015-12-10]. <http://www.astm.org/Standards/F2924.htm>.
- [9] Liu F C, Lin X, Yang G L, et al. Microstructure and residual stress of laser rapid formed Inconel 718 nickel-base superalloy[J]. Optics and Laser Technology, 2011, 43(1): 208-213.
- [10] Sun J F, Yang Y Q, Wang D. Mechanical properties of Ti-6Al-4V octahedral porous material unit formed by selective laser melting[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2012; 1-11.
- [11] Merkt S, Hinke C, Schleifenbaum H, et al. Geometric complexity analysis in an integrative technology evaluation model (ITEM) for selective laser melting (SLM)[J]. South African Journal of Industrial Engineering, 2012, 23(2): 97-105.
- [12] 方林宏,樊军,江莉. 逆向工程和快速成型技术在农具生产中的应用[J]. 农机化研究, 2007, 9(9): 189-191.
- [13] 张云霞. 激光加工技术在农业机械制造中的应用[J]. 农技服务, 2009, 26(3): 145-146.
- [14] 黄永俊. 激光技术在农业机械制造中的应用[J]. 农机化研究, 2008, 6(6): 242-244.
- [15] 裴进灵. 基于 3D 打印的农业机械研发及应用[J]. 当代农机, 2014, 8(8): 73-74, 75.
- [16] Stereolithography[EB/OL]. (2011-01-10)[2015-12-10]. <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>.
- [17] 王立春,赵国群. 快速成型与快速模具制造技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2008:12-95.
- [18] 刘杰. 面向快速成型的设备控制、工艺优化及成型仿真研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [19] 李国强,沈晴映,高建华,等. 选择性激光熔覆技术与铸造法制作全冠适合性的比较研究[J]. 中华口腔医学杂志, 2012, 47(7): 427-430.
- [20] Selective Laser Melting (SLM)[EB/OL]. (2011-01-10)[2015-12-10]. <http://www.custompartnet.com/wu/selective-laser-melting>.
- [21] Yang Y, Su X, Wang D, et al. Rapid fabrication of metallic mechanism joints by selective laser melting[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(B12): 2249-2256.
- [22] Fused Deposition Modeling 44 (FDM)[EB/OL]. (2011-01-10)[2015-12-10]. <http://www.custompartnet.com/wu/fused-deposition-modeling>.
- [23] Charest K, Mak-Jurkauskas M L, Cinicola D, et al. Fused deposition modeling provides solution for magnetic resonance imaging of solid dosage form by advancing design quickly from prototype to final product[J]. Journal of Laboratory Automation, 2013, 18(1): 63-68.
- [24] Boschetto A, Giordano V, Veniali F. Modelling micro geometrical profiles in fused deposition process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 61(9/12): 945-956.