

基于可食用材料的 3D 打印技术应用进展

Development of 3D printing technology based on edible materials

杨来侠 杨繁荣 桂玉莲 李佳璞

YANG Lai-xia YANG Fan-rong GUI Yu-lian LI Jia-pu

(西安科技大学机械工程学院, 陕西 西安 710054)

(College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

摘要:可食用材料范围的延伸加快了 3D 打印技术的发展。但与工程材料相比,针对可食用材料的 3D 打印技术仍然面临很多的挑战。文章介绍了目前较为成熟的 3D 打印技术和其应用领域,并阐述了食品 3D 打印机的结构构成,以及可食用材料 3D 打印的国内外研究进展。总结分析了可食用材料应用于 3D 打印中存在的问题,并展望了未来会有更广泛的应用领域,将对 3D 打印技术发展产生深远的影响。

关键词:3D 打印;可食用材料;应用领域;3D 打印机

Abstract: The extension of edible materials has accelerated the development of 3D printing technology. However, as compared with engineering materials, the 3D printing technology for edible materials still faces many challenges. This review introduced the current mature 3D printing technology and its application field, and expounded the structure and composition of food 3D printer, as well as explained the research progress of edible material 3D printing at home and abroad. Moreover, the existing problems in the application of 3D printing in edible materials were summarized and analyzed, helping to look forward to a wider range of applications in the future, and this would have a profound impact on the development of 3D printing technology.

Keywords: 3D printing; edible material; application field

传统的 3D 打印机仅支持聚乳酸(PLA)和丙烯腈—丁二烯—苯乙烯共聚物(ABS)等塑料材料^[1],并且 3D 打印技术主要应用在工业领域,但随着该技术的发展,渐渐突破性地投入了比如陶瓷、金属等特殊材料。在早些年也将此技术应用到了食品行业中,但目前仍然处于初步研究阶段,并未大量在市场普及,主要原因是可食用材料的复杂性。

相对于传统的食品加工方式,3D 打印技术可以在原材料上对传统畜牧业进行代替,进而提高能源的利用率,降低污染,也可以在一定程度上提高餐饮业的工作效率,将厨师

从繁杂工作中解放出来。当然利用增材制造技术打印食品,其目的并不仅仅是将产品单一生产的过程进行集中化,食物中新的纹理和潜在的营养价值也是其特色之一,并且另一个流行趋势是复杂结构的设计,普通工匠并不能通过手工来完成。类似于此类需求的产品,传统的食品加工方式已远远不能满足其需要^[2]。因此,加快食品加工创新是食品行业持续稳定发展的根本出路,需要不断地投入科技创新^[3]。

1 3D 打印应用现状

3D 打印技术如今已经涉及到生活的各个领域,与传统行业形成互补^[4]。近年来,不仅在机械、航空、医疗^[5]、建筑和艺术等方面有所建树,在食品加工领域也不断地应用创新,获得了各界的广泛关注^[6],具体应用见表 1。目前,已有多种可食用材料应用于 3D 打印技术,其中包括巧克力、谷物零食、冰激凌、饼干、披萨、奶油等^[7],部分成品如图 1 所示。

将可食用材料应用在 3D 打印行业最初是在美国出现,2006 年由美国高中生诺伊·沙尔^[8]用改进后的 Fab@Home 打印机打印出了肯塔基州形状的巧克力。随后迅速在国内外掀起一股热潮,不仅拓宽了材料范围,并且研发出了适应于不同材料的食品打印机。2012 年 7 月,美国宾夕法尼亚大学的研究人员^[9]利用糖、蛋白质、脂肪和肌肉细胞等原材料,用改进的 3D 打印技术打印出生肉,其纹理和口感,甚至肉里的微细血管都和真正的生肉相似。2013 年初,毕业于纽约大

表 1 3D 打印技术应用的领域

Table 1 Application of 3D printing technology

应用领域	产品类型
机械	汽车、零件生产、家电产品
航空	产品制造、精密熔模铸造
医疗	骨骼、生物组织、皮肤植入
建筑	施工模拟、效果展示
艺术	服装、创意、DIY 作品
食品	糕点、巧克力、肉制品
文物	数码娱乐、个性化定制

基金项目:国家 863 计划项目(编号:2015AA042503)

作者简介:杨来侠(1961—),女,西安科技大学教授,博导,博士。

E-mail: 867368760@qq.com

收稿日期:2018-10-22



图 1 3D 打印技术在食品行业的应用

Figure 1 Application of 3D printing technology in food industry

学的 Marko^[10]推出了制作墨西哥薄饼的 3D 打印机原型。2014 年,西班牙 Natural Machines 公司^[11]发明了名为“Foodini”的 3D 食物打印机,采用 6 个喷嘴变化组合制作汉堡、比萨、意大利面和各类蛋糕等食物。而此技术在中国发展也较为迅速,2003 年西安交通大学研究者^[12]采用气压熔融挤压设备打印改性乳化糖材料来制造人工骨模型,2013 年江苏某高校孙铁波等^[13]分析研究了奶油 3D 打印的特点,设计出了奶油 3D 打印机机械系统、控制系统以及奶油喷嘴方案。2014 年福建省蓝天农场食品有限公司利用 3D 打印技术做出个性化的彩色饼干^[14],在颜色上有视觉冲击感,深受儿童和年轻女孩的喜欢,市场销路特别好^[15]。2016 年由清华大学毕业生王鑫等^[16]组成的三弟画饼团队研制软件开发以及硬件,经多次尝试,研发出外形适中的 3D 煎饼打印机,如图 2 所示。



图 2 3D 煎饼打印机和打印的煎饼

Figure 2 3D pancake printer and printed pancakes

2 3D 打印原理及设备构成

2.1 3D 打印关键技术

3D 打印技术是一种新型的快速成型技术,有效结合了计算机技术、数控技术和材料技术等多种技术和工艺,具有独特的优势与广泛的前景^[17],主要的工作原理见图 3。以三维实体模型为基础,通过 Simplified 3D 或 Magics 等分层软件对三维模型进行分层处理,定义层厚、打印速度和打印温度等关键参数,将模型导出为 STL 格式的文件后进行打印,计算机将根据分层软件所传递的信息按照预定路径进行打印,最终层层堆积形成实体件^[18]。3D 打印已提出数十年,目前的 3D 打印方法有很多种,但最为成熟的有以下几种^[19]:

2.1.1 选择性激光烧结(Selective Laser Sintering,SLS) 以粉末材料为原料,利用高强度的 CO₂激光器烧结固化铺洒在

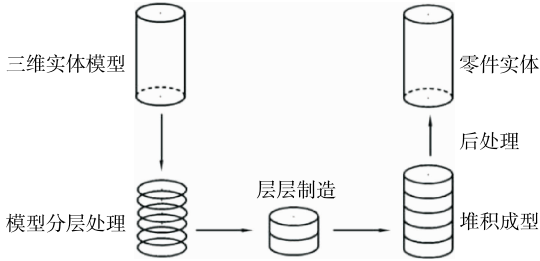


图 3 3D 打印的工作原理

Figure 3 Working principle of 3D printing

成型平台上的粉末,层层叠加直至实体件成型。

2.1.2 熔融沉积成型(Fused Deposition Modeling,FDM)

以丝状材料为原料,通过喷头部位的加热部件使其熔融,最终选择性地涂敷在工作平台上,形成层层截面,叠加后成为三维实物。

2.1.3 立体光固化成型法(Stereo Lithography Apparatus,SLA) 以液态的光敏树脂为原料,利用激光照射使被扫描区域的树脂产生光聚合反应而固化,再次敷上新的树脂层,继续扫描,直至三维实体成型。

2.1.4 激光成型技术(DLP) 与 SLA 技术相似,主要差异表现在 DLP 使用的光源是高分辨率数字光处理器投影仪,每层固化时是整个投影截面的树脂同时固化,效率更高。

2.1.5 三维印刷(Three Dimensional Printing,3DP) 原料为粉末材料及对应的粘结剂,其技术与 SLS 技术相似,由喷头选择性喷射的粘结剂来粘结粉末材料,层层粘结最终形成实体零件。

2.2 食品 3D 打印设备构成

目前应用于可食用材料的多数为桌面型 3D 打印机^[20],是将热熔性食材通过加热熔化,在喷头的移动过程中挤压喷出成型为截面形状,重复进行此程序最终层层粘结获得三维实体。根据此工作原理,开发的 3D 打印设备包含机械部分、挤出机构、成型平台及控制部分^[21]。

2.2.1 机械部分 机架用来承载各个传动部件,包含 X、Y 和 Z 轴的运动部件,因为喷头在运动过程当中会造成一定的冲击,因此必须保证机架的稳定性。在传统的机架分类当中,主要分为 i3、并联臂、UM 和 MB 4 种类型,如图 4 所示。不同结构会决定平台与喷头不同的带动方式,比如 i3 结构就是 Y 轴带动平台运动,X 和 Z 轴控制喷头的定向运动。而 MB 结构则是在 Z 轴上通过步进电机驱动丝杠来控制打印平台上下移动,在设备的顶端会设置有同步带带动 X 和 Y 方向的运动从而定位喷头位置。不同结构各有利弊,使用者会依照实际空间大小、打印的物件类型以及打印过程中产生

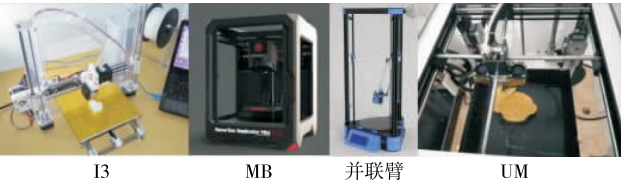


图 4 3D 打印机 FDM 机器的 4 种结构

Figure 4 Four structures of the 3D printer FDM machine

的动量大小来选择。

2.2.2 挤出机构 根据材料的物理形态和流动性来选择挤出装置的类型,对传统的工业材料 ABS 等工程塑料会预先制成丝状,由供丝机构送至热熔喷头进行挤压,未熔的丝状材料会给熔融料一个推力,从而成功挤出。而对于可食用的材料,比如颗粒状的固体材料,物料运输部分就需改为螺杆机构,不仅能够传输物料,也可在此过程中熔融,利用未熔物的挤压作为动力来挤出。而对黏稠状的液体以及糊状材料,则需通过推杆挤出方式,驱动方式可以选择气动式,比如将蠕动泵作为动力源,也可以选择电机挤压式进行挤压,通过步进电机精确控制挤出量进行层层打印。

2.2.3 成型平台 通常情况下是一块平板,用来承载打印物件,如若打印材料性能特殊,为了防止成型件翘曲或变形,会安装可加热平台。在前文中提到,成型平台有的会安装在 Z 轴上进行上下移动,有的则会在水平方向上不动,但在 Y 轴方向移动,还有的则是静止不动,整个机构就是喷头在 XYZ 方向上运动。

2.2.4 控制部分 主要包含温度控制、运动控制、压力控制。针对熔融沉积成型方式,前端加热温度的精确控制能够保证材料的正常熔融,而后端温度控制对挤出物料的黏度有一定的影响,进而影响其成型效果,其中也包括对传感器的控制,在达到预设温度以后机构才开始进入打印过程。而对于已经是黏稠状或糊状的材料,仅仅需要挤压状态的控制,气动挤压则需控制蠕动泵转速来调整空气的进给速度。对于电机驱动的挤压方式,一般是电机带动丝杠进而控制柱塞杆的推动进程,则会调整电机的转速来使进给量适当。X、Y 和 Z 轴配合控制喷头和平台的移动,但都是由电机作为驱动,因此对于适当的定位,在分层软件执行分层等一系列参数调整后均能得到合适的路径进而达到定位。

3 可食用材料成型原理及研究现状

3.1 物理粘结

3D 打印糖果最初提出只是利用蔗糖的吸湿性来成型,世界上最大的 3D 打印机制造商之一——3D Systems^[22]研发出了专门用来打印糖果的 ChefJet 打印机,通过先喷射一层糖,后在上面覆盖一层水,粉末糖遇到水则结晶凝固,未接触到的水则会在后期自动掉落,层层叠加使得糖可以在复杂的形状下迅速塑形。同样是利用蔗糖的物理特性,荷兰的 Aad van der Geest 开发了 ColorPod 设备^[23],用来打印各种色彩的小糖果。ColorPod 的打印过程跟任何粉末床技术一样,铺设粉料后用辊子压平,使用由水和少量乙醇制成的可食用油墨,通过如图 5 结构的装置喷射到由糖和糊精组成的粉末床上,逐层打印直到整个对象完成,最后将其取出,并使用一些胶水或者胶将其硬化。

3.2 熔融挤压成型

由于目前市面上出现的 FDM 设备多以 ABS、PLA 等丝材的进料方式,而作为可食用材料则要考虑其物理状态。早在 2010 年美国康奈尔大学的科研人员^[24]就研制出 3D 食物打印机,把奶酪和巧克力等食材“墨水”预先放进一组注射器

内,再将注射器内各种食材“墨水”按照行列、层叠顺序依次“打印”出立体食物,打印过程如图 6 所示。

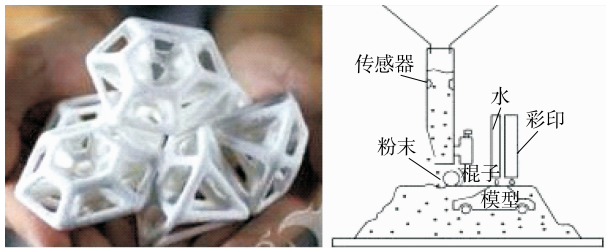


图 5 3D 打印糖制品和 ColorPod 设备
Figure 5 3D printed sugar products sugar products and ColorPod equipment

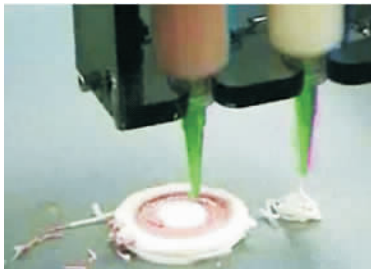


图 6 3D 食物打印机
Figure 6 3D food printer

经过多年的发展,国内外相继出现了各种关于食品打印的例子。2015 年德国知名的糖果制造商 Katjes^[25]展示了其开发的世界上第一款软糖 3D 打印机“The Magic Candy Factory(神奇糖果工厂)”。2015 年杭州电子科技大学研究人员^[26]设计了基于气动控制的 3D 打印系统,调整温度、气压和速度等参数,将熔融蔗糖在 3D 打印机上打印,用来制备出如图 7 所示复杂的组织工程支架,所做研究为蔗糖材料应用于医学组织工程领域奠定了基础。2016 年浙江大学研究人员^[27]将 FDM 工艺与活塞杆挤出功能结合,将黏弹性面粉材料挤出成型为不同形状,如图 7 所示。

2015 年,由赖斯大学和宾夕法尼亚大学的科学家组成的一支生物工程团队^[28]使用糖玻璃和硅胶 3D 打印出一种基本的血管系统,通过逐层 3D 打印糖玻璃,成型为一种格子状的血管,硬化之后用作硅胶模具,最终形成血管灌注通道,如图 8 所示。此结构具备与器官移植相关的一些关键特性,形成的灌注通道完全经受得住血液产生的生理性压力,并且通畅地流动 3 h。虽然这项研究成果暂时不能直接用于医疗行业中,但突破了 3D 打印可移植器官和组织的研究瓶颈,可能以后外科医生就可以将动脉与人工组织相连接。

3.3 选择性烧结

德克萨斯大学奥斯丁分校的 Windell Oskay^[29]制作了一台简易版白砂糖打印机,该设备与 SLS 设备类似,不同之处就是加热源采用一个“狭小、定向运动、低速”的热风枪,通过电机控制二维运动平台的运动,来控制热风枪扫描路径,使白砂糖有选择地熔融,逐层打印。此方法被称为“选择性热风烧结”。打印出的模型呈焦糖色,表面比较粗糙。

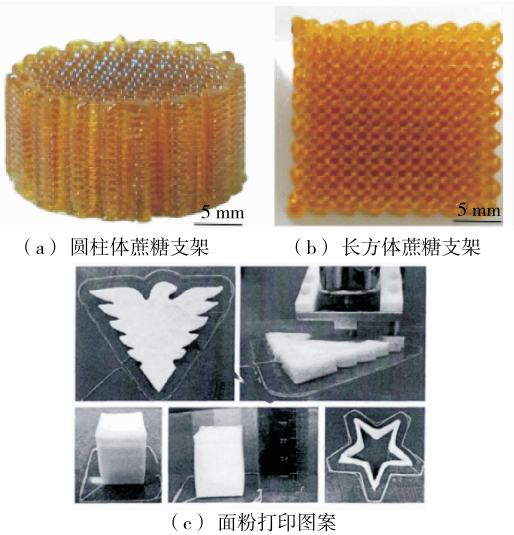


图 7 蔗糖组织工程支架和面粉打印图案

Figure 7 Tissue engineering supports printed by sucrose and flour printing patterns



图 8 3D 打印血管系统

Figure 8 3D-printed blood vessel system

2014 年西安交通大学杨来侠等^[30]研究了选择性激光烧结蔗糖工艺,对蔗糖的物化材料性质和影响选择性激光烧结的成型因素进行了分析。利用 SLS-300 成型机进行试验,并制作出蔗糖模型,并对烧结过程中所需要的工艺参数进行了探索与整理,图 9 所示为 SLS 的成型原理以及以蔗糖为原料的马模型。

4 存在的问题

4.1 材料

目前利用的可食用材料仍然是传统的原材料,为了进一步拓宽 3D 打印的发展道路,应该多寻求一些适合 3D 打印成型的材料。从目前可查到的信息来看,对打印材料的改进也只是涉及到传统意义上的营养、口味的改变,而对专有的

可食用 3D 打印材料却很少见到,因此需要投入更多的时间与精力来研发出更具创新性的 3D 打印材料,实现更高的价值。

4.2 设备

3D 打印设备在制造过程中起着重要的作用,在进料方式上不仅和材料的物理形态有关,最终的成型方式还和材料的其他性质有关。尽管基于可食用材料的 3D 打印机已经出现,但仍然没有市场化,因此还会需要一定的时间来进行改进完善。

4.3 工艺参数

在打印可食用材料的过程中,工艺参数的选择会影响到成品的外观、口味以及力学性能等,而成型件的用途不同,评判标准也就不同。在食品行业,顾客会对色泽、口感特别敏感,而在其他行业,力学性能也必须考虑在其中。若是熔融性材料挤出成型,则需考虑加热温度、挤出温度以及挤出速度。

而粉末状材料在选择加热熔融方式或通过粘结剂粘结成型后,会牵扯到打印时的加热方式以及相应的温度,或者挤出粘接剂的速度。工艺参数不恰当会导致挤出线条断裂或流涎,另外温度过高也会将原料烧糊等等。因此,在后期的研究过程当中,应该将工艺参数的探索作为一个主要工作进行研究。

4.4 清洗方式

用可食用材料进行打印,多数情况下会应用在食品行业,因此安全保障至关重要。一般情况下成品会做食品安全检测,保证安全性,而打印结束后设备的清洗也很重要。但目前不论哪种成型方式,设备的清洗方式都没有具体设计方案,因此在后期设备研发的过程中,应着重考虑到清洗方式的重要性,并且给出一个完整的清洗方案。

5 可食用材料应用至 3D 打印技术中的趋势分析

3D 打印可食用材料不仅可以应用到食品行业,而且可以拓展到艺术、医学甚至航空领域。源于民间糖画的启发,3D 打印技术逐步取代糖画进入工艺品领域,也从最初的二维模型升级到三维模型。应用人群范围也再无局限性,从儿童到年轻人,甚至对于老年人的专有食物,通过添加每个人所需要的特有营养物质,量身定做利于自己身体健康的产品。不仅如此,此技术还可以应用至医疗行业,如利用由糖、玉米糖浆和水构成的糖玻璃来打印生物血管网模板,恰巧是利用了其材料的生物相容性和可溶解性^[28]。并且在工业领域可以利用糖颗粒在温水中融化的性质,与树脂材料混合来打印多孔聚合物^[31],同时因为糖的透明度、低成本和来源广泛的特性,在电影和舞台剧中,糖也被用来模拟玻璃^[32]等,达到逼真但对人无害的效果。单一材料的不断拓展,多种材料的组合都会极力地推动 3D 打印可食用材料的应用范围。

6 展望

针对膳食不平衡的问题^[33],现代人更具个性化的饮食习惯以及产业的多元化,将可食用材料与 3D 打印技术结合

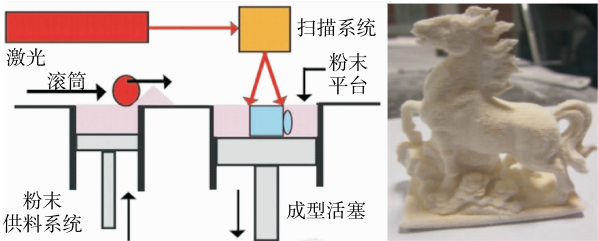


图 9 SLS 成型原理以及 3D 糖打印之马

Figure 9 SLS molding principle and 3D-printed horse

起来是必然之选。利用现有的材料搭配出更具膳食平衡的配方表,满足不同个体的需求。并且进一步研发出适合多种材料的 3D 打印设备,针对不同打印材料分析总结出其特有的工艺参数。对于 3D 打印的物品,不仅能够个性化制作,更能够在一定程度上节省劳动力,提高工作效率,这对社会进步有着一定的推动作用。并且可食用材料的 3D 打印成品不仅给食品行业开辟一条新道路,更能延伸到其他各个领域。相信可食用材料的 3D 打印技术能够在以后的生活当中发挥更大的作用,甚至改善人类的生活^[34]。

参考文献

[1] 褚雪松. 3D 食品打印关键技术研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2016: 7.

[2] 周纹羽, 李哲, 路飞, 等. 三维打印技术在食品加工领域中的应用[J]. 农业科技与装备, 2016(12): 63-66.

[3] 吴世嘉, 张辉, 贾敬敦. 3D 打印技术在我国食品加工中的发展前景和建议[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(1): 1-6.

[4] 言帆. 3D 打印技术的发展和應用[J]. 科技创新与应用, 2017 (32):147-148..

[5] 张阳春, 张志清. 3D 打印技术的发展与在医疗器械中的应用[J]. 中国医疗器械信息, 2015(8): 1-6.

[6] DERBY B. Printing and prototyping of tissues and scaffolds[J]. Science, 2012, 338(6 109): 921-926.

[7] 赖燕娜, 马顺, 李莺, 等. 从专利申请看 3D 打印技术在食品工业中的应用进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 163-166.

[8] 3D 打印: 从想象到现实[J]. 中国对外贸易, 2013(10): 118.

[9] 王冰. 3D 打印技术: 催生原材料革命[J]. 资源再生, 2013(6): 16-17.

[10] 曾子嶙. 上帝创造人类打印[J]. 人物, 2013(4): 52-55.

[11] 3D 食物打印机西班牙问世可自由设计形状打印美食[J]. 中外食品, 2014(1): 5-6.

[12] 张爱英, 王连才, 刘厚利, 等. 基于快速成型技术的组织工程支架制备进展[J]. 化工进展, 2004, 23(3): 267-271.

[13] 孙铁波, 李萌, 李春节. 3D 奶油打印机方案设计[J]. 机电技术, 2013(4): 37-38.

[14] 王博. 浅谈 3D 打印技术的发展与应用[J]. 机电技术, 2014 (5): 158-160.

[15] FERREIRA I A, ALVES J L. Low-cost 3D food printing[J]. Ciencia E Tecnologia Dos Materiais, 2017, 29(1): e265-e269.

[16] 洁文. 清华“煎饼侠”兄弟“3D 打印美食”[J]. 恋爱婚姻家庭: 纪实, 2016(2): 27-29.

[17] 贾礼宾, 王修春, 王小军, 等. 选择性激光烧结技术研究与应用前景[J]. 信息技术与信息化, 2015(11): 172-174.

[18] IRSEN S, LEUKERS B, TILLE C, et al. Image based analysis of bone graft samples made by 3D printing using conventional and synchrotronradiation-based micro-computed tomography [J]. Springer Proceedings in Physics, 2007, 114(3): 121-126.

[19] 李小丽, 马剑雄, 李萍, 等. 3D 打印技术及应用趋势[J]. 自动化仪表, 2014, 35(1): 1-5.

[20] 肖苏华, 巫小珍. 聚乳酸材料在桌面型 3D 打印中的应用研究[J]. 机电工程, 2015, 32(10): 1 344-1 347.

[21] 陈妮. 3D 打印技术在食品行业的研究应用和发展前景[J]. 农产品加工: 学刊, 2014(8): 57-60.

[22] 2015 年从饮食到生活的多方面科技新趋势[J]. 工业设计, 2015(2): 56-57.

[23] BABAEI V, VIDIMCE K, FOSHEY M, et al. Color contoning for 3D printing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2017, 36 (4): 1-15.

[24] 古丽萍. 蓄势待发的 3D 打印机及其发展[J]. 数码印刷, 2011 (10): 64-67.

[25] ALYSSA Dalton. Candy bar debuts 3D printed gummies[J]. Manufacturing automation: Machine Dessig, Systems, Technology, 2016, 31(5): 7.

[26] 赵小波. 基于气动控制的蔗糖支架 3D 打印工艺参数的研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2016: 35.

[27] 丁易人. 基于挤出成型的食材 3D 打印工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017: 51.

[28] BÉGIN-DROLET A, DUSSAULT M A, FERNANDEZ S A, et al. Design of a 3D printer head for additive manufacturing of sugar glass for tissue engineering applications [J]. Additive Manufacturing, 2017, 15: 29-39.

[29] 洪浩鑫. 糖基快速成型材料及成型机理研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2014: 8.

[30] 杨来侠, 洪浩鑫, 姚旭盛, 等. 选择性激光烧结蔗糖工艺实验研究[J]. 激光技术, 2015, 39(1): 114-118.

[31] SONG Xuan, ZHANG Zhuo-feng, CHEN Ze-yu, et al. Porous structure fabrication using a streolithography-based sugar foaming method[J]. Journal of Manufacturing Science & Engineering, 2017, 139(3): 031015.

[32] LEUNG P Y V. Sugar 3D printing: additive manufacturing with molten sugar for investigating molten material fed printing[J]. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2017, 4(1): 1-5.

[33] 刘焕宝, 周惠兴, 刘小龙, 等. 3D 打印在食品行业中的应用[J]. 中国农业文摘: 农业工程, 2017, 29(2): 36-37.

[34] 刘天宇, 周惠兴, 张鑫, 等. 食品及软性材料 3D 打印技术的研究与应用进展[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(5): 55-59.

(上接第 37 页)

[6] 卫盼盼, 吴祚友, 安银立, 等. 烟叶物理特性与打叶风分工艺参数的关系[J]. 烟草科技, 2014(8): 5-9.

[7] 刘楷厘, 王晓娟, 陈良元, 等. 滚筒复烤方式下片烟的尺寸分布变化特征[J]. 烟草科技, 2016(3): 84-90.

[8] 徐大勇, 李新锋, 范明登, 等. 复烤温度对片烟收缩率及大小分布的影响[J]. 烟草科技, 2013(3): 12-16.

[9] 余娜. 片烟结构与叶丝结构关系研究[D]. 郑州: 中国烟草总公司郑州烟草研究院, 2012: 48-57.

[10] 高伟, 王晶, 米锋, 等. 打叶器结构对打后片烟片形的影响[J]. 烟草科技, 2018, 51(1): 93-97.

[11] 吕耀印, 王涛, 杜阅光, 等. 一级打叶单元出叶量及其分布对叶片质量的影响[J]. 烟草科技, 2013(2): 12-15.

[12] 曾静, 徐大勇, 李跃锋, 等. 片烟叶面积分布[J]. 烟草科技, 2010(10): 12-15.