

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2022.02.001

谷物基原料 3D 打印的研究进展

Research progress of 3D printing of cereal-based materials

耿 涵 王 莉 陈正行 左中钰

GENG Han WANG Li CHEN Zheng-xing ZUO Zhong-yu

(粮食发酵与食品生物制造国家工程研究中心, 江苏 无锡 214122)

(National Engineering Research Center for Cereal Fermentation and Food Biomanufacturing,
Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要: 文章介绍了适合谷物基 3D 打印的主要工艺、原理和设备,总结了谷物基原料的打印特性,综述了谷物原料在 3D 打印中的应用和影响打印效果的主要因素,展望了谷物基食品作为 3D 打印原料的前景和挑战。

关键词: 3D 食品; 谷物原料; 打印工艺; 应用现状; 影响因素

Abstract: In this review, the main processes, principles and equipment suitable for cereal-based 3D printing were introduced, and the printing characteristics and application of cereal-based raw materials in 3D printing were summarized, including the main factors affecting the printing quality. Moreover, the prospects and challenges of cereal-based 3D printing was also discussed.

Keywords: 3D food; cereal raw materials; printing process; application status; influencing factors

食品 3D 打印也被称为食品分层制造技术,是一个数字化控制的过程,以三维实体模型为基础,利用食品材料,通过控制温度和压力,经逐层堆积打印形成结构复杂和外型各异的食物产品。食品 3D 打印技术可以个性化定制食物,不仅能丰富食品样式,改良食品品质,还可以调整食品的营养成分以适应不同个体的健康需求以及口味偏好。谷物食品作为中国人的传统主食,在中国居民膳食组成中占有重要的地位。3D 打印技术因其独特的优势,为日常饮食和营养保健的有机结合提供了一个新的思路,也为实现健康谷物食品的个性化定制提供了新的途径。

作者简介: 耿涵,女,江南大学在读硕士研究生。

通信作者: 王莉(1981—),女,江南大学教授,博士。

E-mail: wangli0318@jiangnan.edu.cn

陈正行(1960—),男,江南大学教授,博士。

E-mail: zxchen2007@126.com

收稿日期: 2021-12-20

谷物食品属于多组分食品体系,包含了蛋白质、碳水化合物和脂质等天然材料,拥有剪切稀化和触变性的假塑性非牛顿流体性质,该特殊的流变性质赋予了谷物基材料的 3D 可打印性。3D 打印自引入食品加工业以来,受到广泛关注,目前的研究方向主要分为印刷工艺和材料两部分。文章拟从适合谷物食品的 3D 打印工艺及其原理、打印原料、打印效果 3 个方面进行综述,介绍谷物基 3D 打印的相关进展和存在的挑战,为个性化制造营养、健康的谷物食品提供指导和依据。

1 食品 3D 打印技术原理

1.1 谷物基 3D 打印技术

3D 印刷(3D printing, 3DP)是一种新兴的制造技术,能够通过不同材料的逐层沉积过程,将虚拟的 3D 模型转换为实际的有形结构。3DP 属于增材制造工艺(Additive Manufacturing, AM)的一种。AM 中类似于 3DP 的工艺系统已有 20 多种,其中较为成熟并且被广泛使用的工艺系统有 6 种,具体信息见表 1。目前,技术最成熟应用最广泛的是 SLA^[2],但在食品领域还未见报道,适合食品材料 3D 打印的是 FDM 和 3DP^[3],在此部分主要介绍与谷物最相关的基于挤压工艺的食品 3D 打印技术即 FDM 的技术原理。

熔融沉积法(FDM)适用于热塑性塑料和高黏度的

表 1 增材制造主要应用工艺^[1]

Table 1 Main application process of additive manufacturing

主要工艺	名称及缩写
光固化成型	Stereo Lithography Apparatus, SLA
选择性激光熔融	Selective Laser Melting, SLM
选择性激光粉末烧结	Selective Laser Sintering, SLS
分层实体制造	Laminated Object Manufacturing, LOM
熔融沉积制造	Fused Deposition Modeling, FDM

有机材料,具有成本低、成形原件变形程度小、材料来源广的优势。其工作原理为:首先用三维软件建立工件模型导入 FDM 打印机中。然后将热熔性材料倒入料筒,使用料筒内螺杆传输材料的同时对料筒进行加热,当材料抵达螺杆底部时达到熔融极限温度。材料受力落入喷头熔池,在喷头中继续加热至完全熔化,最后从喷嘴中挤出,在工艺平台上打印成形凝固。工作台外置散热风扇进行工件的降温 and 冷却凝固成形。喷头按照三维软件设定的路线完成当前截面的挤出过程,工件下移开始下一层的喷涂打印,逐层累加直至工件打印完毕^[4]。由于 FDM 设计的灵活性,支持打印种类多样的食品材料,例如图 1 所示,3D 食品打印机主要采用笛卡尔型(Cartesian)、三角洲型(Delta)、极坐标型(Polar)或斯卡拉型(Scara)结构配置,不同的结构配置中打印头在 X、Y 和 Z 轴的腔室中的移动各不相同,适用于不同的打印阶段。其中,笛卡尔型(Cartesian)和三角洲型(Delta)是食品 3D 打印最常用的结构配置。

1.2 食品 3D 打印设备构成

如图 1 所示,3D 食品打印机主要采用笛卡尔型(Cartesian)、三角洲型(Delta)、极坐标型(Polar)或斯卡拉型(Scara)结构配置,不同的结构配置中打印头在 X、Y 和 Z 轴的腔室中的移动各不相同,适用于不同的打印阶段。其中,笛卡尔型(Cartesian)和三角洲型(Delta)是食品 3D 打印最常用的结构配置。

FDM 打印机的挤出机制类型见图 2,分为注射器挤压出料,螺杆挤压出料和气体辅助挤压出料 3 种^[5,7]。注射器挤压出料方式的挤出速率对不可压缩的流体介质而言仅仅与注射器推进的速率和储料罐的截面积相关,可以获得很大的挤出力。对于高黏性流体材料,注射器挤出可以无视其内摩擦力导致的黏度变化实现精确挤出,但是持续供料能力不强。气体辅助挤压出料原理是通过向储存 3D 打印材料的密封腔内加入气体,加大压力,进而将材料从喷嘴挤出。形成的气压越大,挤出的材料越多,越有利于材料快速更换。但由于气体的不稳定性,材料挤出可能发生滞后,具有很难做出快速响应的缺陷。

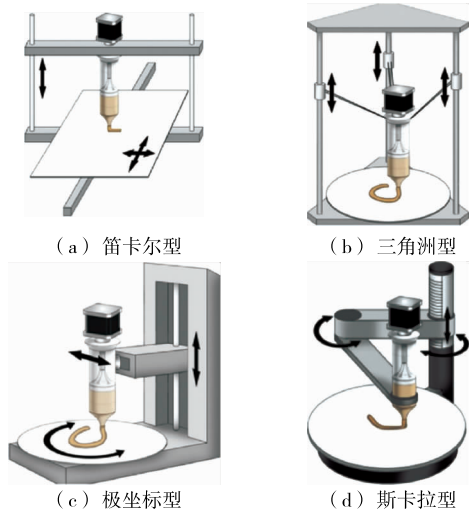


图 1 主要 3D 食品打印机的结构配置^[5]

Figure 1 The configuration of the main 3D food printer

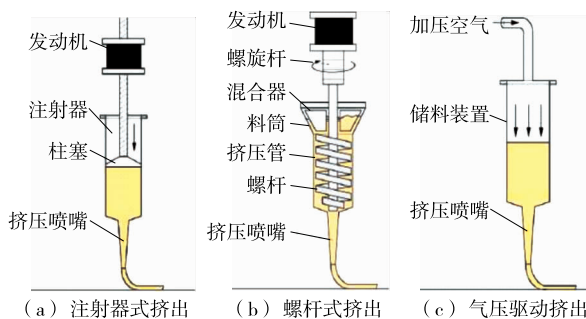


图 2 3D 食品挤出机制的类型^[6]

Figure 2 Types of 3D food extrusion mechanism

螺杆挤压出料挤压力较大,可以实现打印材料的持续挤出,可以用于高黏度材料的打印,但是由于螺杆的不断转动施力,装置内部温度会升高,容易造成材料时变性非牛顿流体的黏度变化,不利于稳定供料,同时螺杆挤出装置的清洗也比较困难。

FDM 打印机由 4 个主要部分组成:打印头(主要包含进料斗、进料桶/注射器/墨盒、挤出头)、数字控制接口、打印台和可移动外壳。机架是 FDM 打印机的主体机械结构,是包含 X、Y、Z 轴运动部件及各个传动部件的承载体,机架的稳定对喷头打印过程中的精度有很大的影响。传统的机架主要分为 i3 型(龙门架结构)、并联臂型、XYZ 型 3 种类型,如图 3 所示。不同的机架结构平台与喷头的运动方式各不相同,i3 结构机架 Y 轴带动成型平台移动,X 和 Z 轴控制喷头运动;并联臂型结构相对稳定,可以在 X、Y、Z 轴上进行机械运动;而 XYZ 箱型结构机架则是打印机座固定在 Z 轴,X 和 Y 轴控制喷头。

常用的 FDM 打印喷嘴按制造材质可分为塑料喷嘴和金属喷嘴,按照喷嘴内部管道形状可以分为标准型喷嘴和锥型喷嘴,如图 4 所示^[9]。金属喷嘴比塑料喷嘴有更好的散热性能。标准喷嘴的流道长径比更大,黏弹性打印材料需要经过更长时间才能从喷嘴中被挤出,能够促进材料在压缩变形中积存的弹性势能的释放,防止挤出胀大现象的发生。而正是由于长径比比锥型大,标准型喷嘴更容易发生堵塞。

1.3 打印后续处理

3D 打印除了主要的制作程序之外,还可以使用适宜

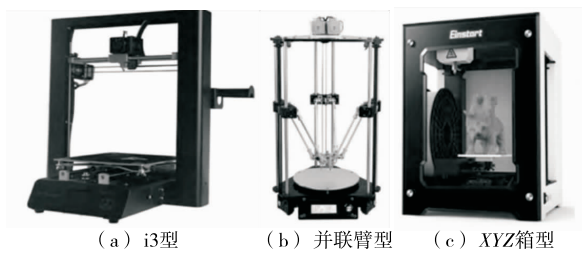


图 3 FDM 机器机架 3 种结构^[8]

Figure 3 Three structures of FDM machine frame



图 4 FDM 工艺的金属喷嘴

Figure 4 Two metal nozzles of FDM process

的后续处理工序,增加工件的强度、硬度,防止粉末材料掉落,延长打印工件的使用寿命。使用主要的后处理过程包括:静置、强制固化、去粉、包覆等。静置是指在打印结束之后将打印好的工件静置一段时间,使粉末材料和粘结剂或粉末材料之间交联固化完全^[10]。强制固化是指,当模具已经有了一定的强度之后,通过加热、真空干燥、紫外光辐射等外力方式进一步强化粉末相互作用力^[11]。强制固化完成后,模具已经具备较强的硬度,但还需要将表面未交联的多余粉末除去。大部分的粉末可以通过刷子除去,剩余的粉末可以通过特殊溶剂浸制、机械振动、微波振动和风力的方式除去^[12-13]。最后还要考虑模具的长久保存,常见的方法有在模具外或关键连接部位使用防水固化胶,或者将模具放入具有保护作用的聚合物中,比如环氧树脂、熔融石蜡等,达到防水、坚固、不易变形的效果^[12]。

2 谷物基 3D 打印材料

当前使用的大多数 3D 食品打印方法都是基于材料挤压技术,即将食品原料通过气压推入喷嘴并按照特定的模式沉积在目标板上^[14-15]。这样的技术可以实现连续印刷,并且特别适合于使用液体或低黏度材料的食品制备。谷物食品是中国传统膳食的主体,主要包括大米、小麦、小米、大豆等及其他杂粮。谷物食品材料属于多组分食品体系,包含了碳水化合物和蛋白质、脂质等成分,各组分的含量变化均会影响食品材料的质地和流变特性,进而影响热挤压 3D 打印效果。对于碳水化合物基材料和蛋白基材料,可以通过凝胶化来实现流动和自支撑性,而对于脂肪基材料则是通过加热熔融和降温凝固使其具备一定的结构强度利于沉积成型^[9]。现已成功将 3D 打印技术应用于打印巧克力^[16]、肉糜^[17]、奶酪^[18]等物质中,但是将谷物基材料应用于 3D 打印的研究并不多。谷物食品来源丰富,种类繁多,成本合理,可扩大 3D 打印技术在食品领域的应用范围,增加适用于 3D 打印的材料,挖掘出谷物原料的更高价值。

2.1 谷物基材料 3D 打印特性

2.1.1 流变特性 适用于 3D 食品打印的最常见材料是碳水化合物、脂肪、蛋白质、纤维和其他功能成分^[19]。理论上所有的软性食品材料都可以作为 3D 打印的原料,但

热挤压 3D 打印成型性主要受到食品材料流变特性的影响。挤出喷嘴后在重力的作用下材料经历低剪切力作用,因此要求材料具有剪切稀化特性以及对交变剪切应力快速和可逆的模量松弛响应。淀粉作为谷物食品材料的主要结构成分,其黏弹性流体属于典型的剪切稀化和触变性非牛顿假塑性流体。特殊的流变性质赋予了淀粉材料的热挤压 3D 打印可行性。因此,谷物原料作为 3D 打印的材料具有广阔的空间。然而,由于谷物原料品种繁多,用于 3D 打印的各种淀粉原料的流变性不尽相同;且食品体系复杂,各成分混合后的结构和流变特性都处于未知状态,因此对不同品种的淀粉材料的打印特性需要区分了解。

余阳玲等^[20]发现马铃薯、小麦和玉米淀粉凝胶均可获得完整的 3D 打印模型,其中小麦淀粉凝胶具有较低的黏度、较好的挤出性和贮藏性能,用小麦淀粉制作的 3D 打印样品的尺寸最接近 CAD 设计模型,且微观结构更为规则,是较为理想的谷物基 3D 打印材料。陈涓^[9]发现大米淀粉、玉米淀粉较佳打印区质量分数分别为 15%~25% 和 15%~20%,均呈现出剪切稀化和对交替剪切应变刺激下模量的快速响应特性,原因是较高的淀粉浓度导致凝胶的屈服应力、流动应力和储能模量增加。其中质量分数为 15%~25% 的淀粉悬浮液通过在 70~85 °C 的温度下加热,获得的打印成品具有出色的挤出加工性能和机械完整性。Guo 等^[21]运用 CFD 模拟和打印试验评估了黑米、绿豆、糙米和荞麦作为 3D 打印材料的流体动力学,结果表明绿豆凝胶的黏度最低,但荞麦凝胶具有较高的稳定性,该研究倡导未来的探索应通过使用结构力学模拟来评估各种印刷材料的机械性能和结构稳定性。总之,淀粉的流变特性对各类谷物材料的流变性能有关键的影响作用,也决定了热挤压 3D 打印技术能否应用于谷物食材的加工制造。

2.1.2 质地特性 对于谷物基 3D 打印材料,虽然谷物原料种类多,流变性能有差异,但可以通过改变 3D 打印参数、原材料组成^[22]等方式改变内部结构^[14]以构建个性化的质地特性的 3D 打印食品。Derossi 等^[23]通过研究小麦/米粉混合物 3D 打印工艺对谷物零食的微观结构和质地的影响发现,微观结构的多样性极大地影响了产品的机械性能,3D 打印样品有着更高的硬度、咀嚼性和内聚性。这证明了改变 3D 结构中孔隙的形态和分布,能够影响谷类零食的质地。还有研究者^[24]发现在打印过程中使用相同的填充水平,但印刷不同的图案,产品硬度有显著差异;相反,当使用较软的食物——糙米作为原料时,填充模式对产品质地无影响。Feng 等^[25]研究了空气炸制品的质地特性,发现对于 20% 低填充的样品,硬度遵循平行结构>交叉结构>复杂结构的顺序。因此,需要广泛试验打印变量对谷物基原料 3D 打印效果的影响,以应对

不同要求下所需的产品的质地。

2.2 谷物基材料 3D 打印应用

对于日常主食材料,打印得较成功的食材为面糊、面团^[14,26],而对于大米、小米、燕麦等其他谷物基的食材研究并不够深入。这主要是由于这些食品材料多数打印支撑性能弱和结构造型差不能满足挤压 3D 打印工艺的要求,且在挤压沉积过程中力学强度也不够,导致产品坍塌变形,成型效果不佳^[27]。可对这些食品材料进行一定的前处理,改变其流变学特性、质地特性来调控其挤压打印和沉积性。目前,由面糊制成的食物——营养主粮饼干^[28]、添加益生菌的小麦零食^[29]、燕麦米粉^[30]等食物一—通过改变食品配方、调整工艺参数等形式实现 3D 打印。

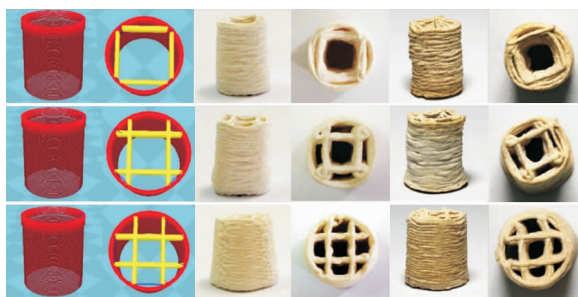
在中国,章云等^[31]使用富硒米粉、玉米粉、荞麦粉以及其他材料制成了一款玉米米粉 3D 打印材料。周泉城等^[32]将玉米淀粉与马铃薯淀粉或木薯淀粉中的一种或两种的混合,再与蛋白混合,加水糊化,最后制成 3D 打印机成型材料,可打印任何造型的食材或模型等,打印物成型好,层叠界限不明显,适合于蒸煮、烘焙、煎炸等后续加工。郑波等^[33]将玉米粉、燕麦粉、小米粉、荞麦粉、木薯全粉按一定比例与其他材料混合,进行熔融沉积 3D 打印,堆叠出所需的三维实体食物,再放入烤箱烤制成杂粮饼干。制成的饼干可以保持精致和复杂的图案形状,实现了产品营养与美观的结合。国外,Sun 等^[5]使用可互换的挤出机制造多材料蝴蝶饼干,其中使用含有不同食用色素的相同面团材料来呈现多种颜色,见图 5。Severini 等^[34]以小麦粉为原料,设计出不同的填充量、层高、固形物含量的 3D 打印谷物零食,见图 6。Derossi 等^[35]利用小麦面团多层打印成功再现了苹果组织的微观结构特征,表明食品 3D 打印能够模仿生物组织的形态学特性。

除了制作成食品,谷物原料也被制作成不同的 3D 打印材料,应用于不同的领域。如俞克波^[36]对玉米秸秆进行表面改性处理,增强了材料的致密性和稳定性,将粒料干燥后粉碎成细小粒料再进行 3D 打印,确保材料表面的光滑性,制备的材料具有良好的耐腐蚀性、尺寸稳定性。褚忠等^[37]将小麦粉、糯米粉等材料混合,制成了一种 3D



图 5 3D 印刷曲奇

Figure 5 3D printed cookies



设计的 3D 打印产品 打印后的原始样品 经过烘焙后的样品

图 6 不同 3D 打印设计获得的印刷和烹饪小吃

Figure 6 Printing and cooking snacks obtained by different 3D printing designs

打印面塑材料。该面塑材料制备速度快,有良好的可挤出性及可堆积性,硬化后呈乳白色,可以 3D 打印出各种复杂模型。叶静等^[38]发明了一款由玉米、大米等原料制作的打印餐具的 3D 打印机,可自动实现餐具打印成型,以减轻洗碗的负担。这些应用丰富了谷物基 3D 打印的研究意义,拓宽了谷物材料的应用场景,提升了谷物的附加值。

3 影响谷物基 3D 打印效果的因素

3D 食品打印成功与否,受到打印材料的混合流变性,结构准确性和形状稳定性,与传统食品加工技术(例如烘焙和干燥)的兼容性以及打印速度的多重挑战。使用 3D 打印制造具有复杂结构的食品在很大程度上取决于材料的物理特性,比如物料的质地分布、黏度、比率等因素;其次,材料的可印刷性,例如凝胶化,熔融和玻璃化转变温度。再而,加工参数也会影响 3D 打印过程中食物的形成和质量,包括喷嘴的高度和直径及材料的流速^[39]。除此以外,后期处理也不得忽视。因此,为了使谷物基原料具有较理想的挤压 3D 打印成型性,需要在制作谷物基 3D 打印食品的过程中进行多方面的充分考虑。

3.1 适用性

3D 打印技术的适用性主要取决于材料的物理、化学性能。这些材料应该是均质的,并具有适当的挤出流动性,并可以在印刷过程中和印刷后支撑其结构^[40-42],或者可以与结构材料有效混合。软质材料的黏度应既能满足易于通过细喷嘴挤出的要求,又能保持随后沉积的层的形状^[40]。大多数天然谷物基食物不具备印刷所必需的流动特性^[43],为了扩大 3D 打印技术的使用范围,可通过添加剂或加工过程对食品材料进行物理改性来实现适当的流动性能。

在使用添加剂方面,研究较多的是将水胶体添加到打印材料中以调节糊化性能、黏度和流动性,将不同品种的淀粉混合或添加蔗糖等方式也可以改变 3D 打印原料的物理性能。Azam 等^[44]将阿拉伯胶、瓜尔豆胶、*k*-卡拉

胶和黄原胶加入到橙浓缩物—小麦淀粉中,胶的添加导致橙浓缩物—小麦淀粉混合物的表观黏度、储能模量(G')和损耗模量(G'')增加。其中,使用含有 k -卡拉胶的共混物打印的样品具有最大保真度和良好的承重能力,可防止由于适当的 G' 值而随时间崩塌。Vancauwenberghe 等^[45]研究得到果胶浓度是打印物体牢固度和强度的主要决定因素,糖和果胶的浓度增加了黏度并影响了打印质量。Yang 等^[46]发现烘烤面团的凝胶形成特性和物理性质会随水、蔗糖、黄油、面粉和鸡蛋含量的不同组成而变化。总之,为获得更好的成型样品形状应满足假塑性凝胶的要求,如相对较高的可挤出性、凝胶强度、弹性和相对较低的延展性等。

在物理改性方面,Maniglia 等^[47]使用简单的物理技术干式热处理对木薯淀粉进行改性,得到了更好的打印材料。因为干式热处理时间的增加产生了具有较高羧基含量和较大颗粒尺寸的淀粉,降低了吸水率,增加了水溶性指数,影响了颗粒的结晶度并减小了分子大小。Xu 等^[48]使用超声波—微波联合预处理方式对小麦淀粉—木瓜 3D 打印原材料进行改性,发现在相同超声处理条件下,当微波功率为 80 W 时样品 G' 、 G'' 和结合水比增加,成品的支撑稳定性、线条均匀性和高度保持性相对处于最佳水平。

3.2 可印刷性

可印刷性取决于如何对材料的属性进行处理,通过 3D 打印机打印并保持打印后的结构。对于 3D 打印在食品领域的实际应用,特别是谷物类产品,应根据谷物原料的机械性能对打印参数进行精确设置,提高谷物基原料的可印刷性。

若选择普通小麦面粉作为基质,小麦面团的可印刷性取决于其在水含量、面粉类型和添加剂含量方面的组成。首先,如果加水量太少,面团将无法均匀混合,并容易阻塞针头,影响印刷质量和食用味道。而如果加水太多会使面团变得太软,样品在印刷后很容易塌陷,从而难以获得合适的形状。其次,面团的组成影响其动态流变性能和微观结构^[49]。具有较高的黏弹性模量、损耗因子、复数黏度和屈服应力的面团配方显示出良好的印刷效果和印刷后的足够稳定性^[50]。因此,为了实现小麦面团的印刷,需要优化其配方。Liu 等^[51]比较了小麦粉、芒果粉、橄榄油、水等材料对于 3D 打印食品质量的影响。在不添加冷冻干燥的芒果粉和橄榄油的情况下,面粉与水的比例为 5:3 (g/mL) 时,可获得最佳的食物印刷质量。另外,当压缩压力、针速度、针直径和内部填充率分别为 600 kPa, 6 mm/s, 0.58 mm 和 50% 时,打印样品质量最高。Severini 等^[34]分析了填充密度和层高水平对小麦面团印花性能的影响,证明样品的直径与层高直接相关,而样品的高度则随层高的增加而减小,这归因于当层高增

加时面团的不规则沉积。另一方面,填充水平对生和熟零食的固体成分的变化更为重要,样品的断裂强度与填充量密切相关。Severini 等^[52]在小麦粉面团中添加不同量的黄粉虫幼虫,应用 3D 打印技术制作出一款可丰富蛋白质来源的谷物基小吃,效果见图 7。结果显示一定数量的昆虫会导致面团变软并导致面团沉积溢出,增加食物样品的直径,高度和重量,改变谷物零食的形态和微观结构。

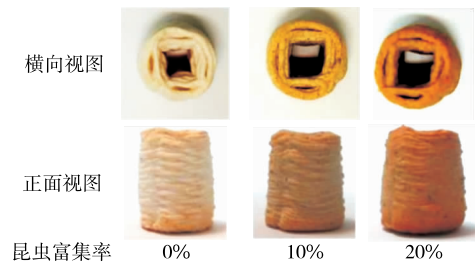


图 7 不同黄粉虫含量的 3D 打印小麦基零食

Figure 7 3D printed wheat-based snacks with different insert content

大米面团是非牛顿流体,具有高剪切稀化行为,并且表现出类似于弱凝胶的流变行为^[53-54]。Anukiruthika 等^[55]对米粉混合物(大米粉、蛋黄、蛋清)的各种挤出印刷参数进行了优化,包括印刷成分、喷嘴高度、喷嘴直径、印刷速度、挤出马达速度和挤出速率。结果表明,添加填料($m_{\text{蛋黄粉/蛋白粉}} : m_{\text{大米粉}}$ 为 1:1, 1:2)对提高印刷的蛋黄和蛋清的稳定性和强度具有显著影响。在 Huang 等^[24]的研究中,通过更改打印变量(即喷嘴尺寸、周长和填充密度)来研究糙米的 3D 打印精度,打印效率和质感特性,评估糙米的可印刷性。结果显示,较小尺寸的喷嘴可以提高 3D 打印样品的大小,喷嘴尺寸不仅会改变孔隙率,还会改变沉积的层数,可减少印刷时间;质地特性如硬度和胶黏性与填充密度密切相关;而 Liu 等^[56]研究了糯米、粳米、籼米 3 种流行大米面团的 3D 可印刷性,发现米粉的流变学性质受其配方的影响明显,并且与其适印性能之间无定量关系。进一步研究了 3D 打印与传统食品加工技术的兼容性,发现由于糯米支链淀粉含量较高,在蒸煮过程中发生溶胀,显示出最差的形状稳定性和最高的体外淀粉消化率。而籼米和蒸制的粳米中则出现了相反的现象,表明籼米和粳米可能是有前途的 3D 打印材料。

3.3 后处理

理想情况下,3D 食品结构应能够抵抗后处理,在食品印刷领域,后处理包括烹饪过程,例如烘烤、油炸和蒸煮,以改善食品原料的风味或使其转化为可食用状态^[26]。各种软质材料(如曲奇、奶酪和蛋糕糖霜)的沉积已通过基于挤出的 3D 打印技术完成^[29]。然而,这些物体不适用于常规食品加工技术,并且在后加工处理后会大大变

形。为了实现 3D 打印工艺在食品上的广泛应用,该技术必须易于与传统食品加工步骤兼容^[57]。加工后用于保持物体形状稳定性的两种主要方法是改良配方、使用添加剂或者是选择合适的加工方法^[29]。Pulatsu 等^[58]发现减少的曲奇面团的含糖量可在烘烤后产生结构稳定的曲奇,同时增加牛奶含量可增强打印介质的流动性。Lille 等^[14]验证了印刷后的形状稳定性与糊的屈服应力有关。

通过烤箱干燥进行的后处理在印刷样品的初始固体含量高(<50%)时最为成功。图 8 展示了烤箱和冷冻干燥分别对不同 3D 打印样品外观的影响,可以看出对于初始干物质含量为 35%以下的样品,冷冻干燥比烘烤干燥能更好地保存印刷结构。除此以外,在一项研究^[50]中也发现,小麦面团的结构表面积/体积比的增加会加速其烘烤过程,可降低后处理对于 3D 打印样品的结构破坏。

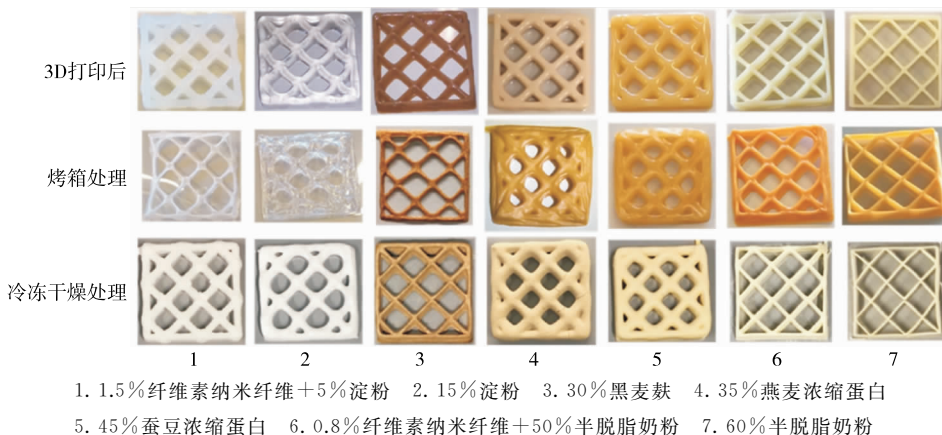


图 8 烤箱和冷冻干燥对 3D 打印样品外观的影响

Figure 8 The influence of oven and freeze-drying on the appearance of 3D printed samples

但是某些产品,如 3D 打印的饼干,虽然在面团中改良黄油、蛋黄和糖的配方可以提高产品形状的稳定性的^[57],但是较大的组成变化会影响最终产品的质地特性。因此,重要的是既要允许产品在后期的加工过程中产生最低程度的变形,同时又保持最终产品所期望的性质。水解胶体是亲水性材料,被添加到食品中以改善性质,例如胶凝或增稠^[59],并有可能在后加工过程中提高食品材料的机械稳定性。Kim 等^[60]用水胶体部分取代小麦粉,研究了温度变化过程中水胶体的掺入对饼干面团尺寸稳定性的影响。结果表明,具有 0.5 g/100 g 黄原胶的曲奇面团可以平滑地打印,并且在后处理过程中成功地保留了其 3D 设计形状。这项研究引入了一种在后处理中改善 3D 打印对象的形状保持性的技术,并更好地理解应用于食品材料 3D 打印的处理步骤所需的材料特性。如何在不同的食物系统中获得广泛的配方和印刷参数,是一个巨大的挑战,也是成功进行 3D 食物打印的关键。因此需加强对谷物基材料性能的研究,对实现可打印性,可后续加工性起着重要的作用。

4 谷物基 3D 打印面临的挑战

为了扩大 3D 打印在食品领域的应用,许多研究者和企业都在研究以改进这项增材制造技术。虽然该技术可以制造出复杂而个性化的食品,包括适宜的质地,良好的外观和定制的营养成分,且在加工灵活性、精度、废料产生量和设计自由度等方面具有优势,但目前食品工业

的批量生产中却很少使用,主要是因为当前的 3D 打印技术受到成本、时间和大规模生产的限制。因此该技术不能被认为是传统食品生产的替代品,而是一种生产定制食品的方法。除此以外,谷物基 3D 打印技术在发展道路上还面临着其他挑战^[5]。

4.1 原材料的材质问题

选择具有适当物理、化学、流变和力学性能的打印材料对 3D 打印至关重要。谷物基食品材料在印刷过程中的交联反应、热稳定性、粒径分布、容重、润湿性和流动性都会对印刷结果产生影响,比如颗粒尺寸会影响食品打印材料的均匀程度^[61]。其次,3D 印刷的谷物基材料的保质期非常有限,制作出食品的流变学特性可能会随着时间而改变,导致保质期缩短。这些问题都要继续进行深入研究。

4.2 营养风味问题

谷物基 3D 打印材料的质地风味,营养价值可能受到打印过程的影响。打印和烹饪两个过程对于食物的基本营养成分的影响暂不清楚,需要进一步探究来提高打印食品的质地风味和营养价值。其次,打印工艺和烹饪手法还没有精确匹配。不同的打印工艺对食材的影响不同,与不同烹饪方式的契合度也不同,比如烘焙的高温会影响到 3D 打印面团的延展性和结构强度^[62]。需要研究者探明这其中的关系进而控制打印食品中味道、香气和颜色的形成。现阶段的许多 3D 打印材料都是用来建立

复杂的三维结构,营养价值不佳,还需要进一步开发建模性能好且具有一定营养价值的谷物基打印材料^[40]。

4.3 用户交互界面不够完善

当前用于 3D 打印的用户界面功能比较少,并且需要计算机输入并依赖于 CAD 模型来构建 3D 食品结构。但是大部分用户不会使用 CAD 软件进行设计,门槛比较高。当前用户需要开放数据库系统,将设计换转为具有打印路径和相关处理参数的数字 3D 模型,当有人在网站上发布 3D 打印食谱时,其他人可以很容易地重现打印成果。用户界面应当尽可能地向着大众化和低门槛的方向设计,有助于吸引更多用户。

5 展望

3D 食品打印是一项革命性的技术,可以用于在质地、风味、外观和营养成分方面具有非常特定的几何形状或功能的食品。谷物基作为 3D 打印的原料,目前受到越来越多的关注。一方面,谷物原料因“健康与营养”受到消费者的青睐,另一方面,对 3D 食品打印的研究目前还处于初级阶段,研究者们正在探究更多的打印材料以优化可印刷性。虽然中国食品 3D 打印还有诸多缺陷没有解决,但是谷物基 3D 打印仍具有不可替代的优势^[3]。

(1) 降低生产成本:首先,随着 3D 打印机器更加智能、便捷,未来的谷物基 3D 打印机将具有占地面积小、生产效率高、适用范围广、操作简便等特点,可以利用有限的条件生产出更多的粮食和商品。其次对于原料的研究和把控将更加精细。粉末状原料具有低生产成本和长保质期的特点,进一步降低粮食生产成本。最后个性化定制能够根据消费者需要对食品进行定制,最大限度利用资源满足社会需求,减少浪费现象。

(2) 个性化定制:谷物基 3D 打印未来将根据个人营养要求甚至个人对于颜色、形状、口味要求对食品进行定制,进一步满足消费者个性化需求。对于特殊人群,比如儿童、老人、肥胖人群、糖尿病患者等,可以通过 3D 打印技术对每天营养摄入进行量化和控制,更科学地减轻或延缓肥胖、糖尿病等疾病。

3D 打印提供了一个以低成本和高质量创新开发食品的机会^[63]。现代人不平衡的膳食结构、逐渐个性化的饮食习惯和多元化的产业模式预示着未来谷物基 3D 打印技术的蓬勃发展。推动谷物基 3D 打印技术的发展,必将推动传统食品加工的变革。

参考文献

- [1] VAEZI M, SEITZ H, YANG S. A review on 3D micro-additive manufacturing technologies[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, 67(5/8): 1 721-1 754.
- [2] 王琪,李慧,王赛,等. 3D 打印技术在食品行业中的应用研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(1): 16-19.
- [3] WANG Qi, LI Hu, WANG Sai, et al. Research progress on application of 3D printing technology in food industry[J]. *Cereals & Oils*, 2019, 32(1): 16-19.
- [3] 贲宗友,施宗情,孙艳辉. 3D 打印在食品中的应用研究进展[J]. *轻工科技*, 2018, 34(9): 4-6.
- BEN Zong-you, SHI Zong-qing, SUN Yan-hui. Research progress in the application of 3D printing in food[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2018, 34(9): 4-6.
- [4] 杨繁荣. 基于熔融沉积法的蔗糖 3D 打印工艺研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019: 33-35.
- YANG Fan-rong. Research on sucrose 3D printing process based on fused deposition modeling[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019: 33-35.
- [5] SUN J, ZHOU W, YAN L, et al. Extrusion-based food printing for digitalized food design and nutrition control[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 1-11.
- [6] KEWUYEMI Y O, KESA H, ADEBO O A. Trends in functional food development with three-dimensional (3D) food printing technology: Prospects for value-added traditionally processed food products[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 10: 1-38.
- [7] 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: 13-15.
- DING Yi-ren. Research on the three dimensional printing process of food materials based on extrusion molding[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017: 13-15.
- [8] 徐海璐,房剑飞,韩雪,等. 基于机械臂的 3D 打印机控制系统研究[J]. *机械工程师*, 2021(5): 9-10, 4.
- XU Hai-lu, FANG Jian-fei, HAN Xue, et al. Research on 3D printer control system based on robotic arm[J]. *Mechanical Engineer*, 2021 (5): 9-10, 4.
- [9] 陈涓. 热挤压 3D 打印成型性与淀粉材料结构及流变特性的关联研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019: 26-29.
- CHEN Huan. Correlation of hot-extrusion 3D printing behaviors with structure and rheological properties of starch[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019: 26-29.
- [10] SACHS E M, HADJILOUCAS C, ALLEN S, et al. Metal and ceramic containing parts produced from powder using binders derived from salt: US 6508980[P]. 2003-01-21.
- [11] SACHS E M. Powder dispensing apparatus using vibration: US 6036777[P]. 2000-03-14.
- [12] LORENZ A M, SACHS E M, ALLEN S M. Techniques for infiltration of a powder metal skeleton by a similar alloy with melting point depressed: US 6719948[P]. 2004-04-13.
- [13] SACHS E M, CIMA M J, CARADONNA M A, et al. Jetting layers of powder and the formation of fine powder beds thereby: US 6596224[P]. 2003-07-22.
- [14] LILLE M, NURMELA A, NORDLUND E, et al. Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 20-27.

- [15] SUN J J, NANU R, RAY R S. A low cost, simplified, and scaleable pneumotachograph and face mask for neonatal mouse respiratory measurements[J]. *Journal of Pharmacological and Toxicological Methods*, 2017, 86: 1-11.
- [16] HAO L, LI Y, GONG P, et al. Chapter 8: Material, process and business development for 3D chocolate printing[M]// GODOI F C, BHANDARI B R, PRAKASH S, et al. *Fundamentals of 3D Food Printing and Applications*. [S.l.]: Academic Press, 2019: 207-255.
- [17] DICK A, BHANDARI B, PRAKASH S. 3D printing of meat[J]. *Meat Science*, 2019, 153: 35-44.
- [18] LE TOHIC C, O'SULLIVAN J J, DRAPALA K P, et al. Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 56-64.
- [19] JIANG H, ZHENG L, ZOU Y, et al. 3D food printing: Main components selection by considering rheological properties[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(14): 2 335-2 347.
- [20] 余阳玲, 仝兆斌, 江昊, 等. 淀粉原料 3D 打印特性[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(3): 194-200.
- YU Yang-ling, TONG Zhao-bin, JIANG Hao, et al. Characteristics of 3D printing by starch gels model[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(3): 194-200.
- [21] GUO C, ZHANG M, DEVAHASTIN S. 3D extrusion-based printability evaluation of selected cereal grains by computational fluid dynamic simulation [J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 286: 110113.
- [22] LIU Z, DICK A, PRAKASH S, et al. Texture Modification of 3D Printed Air-Fried Potato Snack by Varying Its Internal Structure with the Potential to Reduce Oil Content[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(3): 564-576.
- [23] DEROSSI A, CAPORIZZI R, ORAL M O, et al. Analyzing the effects of 3D printing process per se on the microstructure and mechanical properties of cereal food products[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 66: 102531.
- [24] HUANG M S, ZHANG M, BHANDARI B. Assessing the 3D printing precision and texture properties of brown rice induced by infill levels and printing variables[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(7): 1 185-1 196.
- [25] FENG C, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Use of potato processing by-product: Effects on the 3D printing characteristics of the yam and the texture of air-fried yam snacks [J]. *LWT*, 2020, 125: 109265.
- [26] SUN J, PENG Z, ZHOU W B, et al. A review on 3D printing for customized food fabrication[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 1: 308-319.
- [27] SUN J, ZHOU W, HUANG D, et al. An overview of 3D printing technologies for food fabrication[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2015, 8(8): 1 605-1 615.
- [28] 郑波, 陆萍, 池承灯, 等. 一种基于 3D 打印技术制作营养杂粮饼干的方法: CN107079958A[P]. 2017-05-02.
- ZHENG Bo, LU Ping, CHI Cheng-deng, et al. A method for making nutritious staple food biscuits based on 3D printing technology: CN107079958A[P]. 2017-05-02.
- [29] ZHANG L, LOU Y, SCHUTYSER M A I. 3D printing of cereal-based food structures containing probiotics [J]. *Food Structure*, 2018, 18: 14-22.
- [30] 章云, 张贝尼. 一种燕麦米粉 3D 打印食品材料及其加工方法: CN106234931A[P]. 2016-07-28.
- ZHANG Yun, ZHANG Bei-ni. A 3D printing food material of oat-meal flour and its processing method: CN106234931A[P]. 2016-07-28.
- [31] 章云, 张贝尼. 一种玉米米粉 3D 打印食品材料及其加工方法: CN106071742A[P]. 2016-07-28.
- ZHANG Yun, ZHANG Bei-ni. A 3D printing food material of corn flour and its processing method: CN106071742A[P]. 2016-07-28.
- [32] 周泉城, 苏新勇, 冯传兴, 等. 复合淀粉 3D 打印材料制备及工艺: CN107048454A[P]. 2017-03-22.
- ZHOU Quan-cheng, SU Xin-yong, FENG Chuan-xing, et al. Preparation and technology of composite starch 3D printing materials: CN107048454A[P]. 2017-03-22.
- [33] 郑波, 陈洹, 刘誉繁, 等. 一种基于 3D 打印技术制作营养杂粮饼干的方法: CN107242266A[P]. 2017-05-02.
- ZHENG Bo, CHEN Huan, LIU Yu-fan, et al. A method of making nutritious multigrain biscuits based on 3D printing technology: CN107242266A[P]. 2017-05-02.
- [34] SEVERINI C, DEROSSI A, AZZOLLINI D. Variables affecting the printability of foods: Preliminary tests on cereal-based products[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 38: 281-291.
- [35] DEROSSI A, PAOLILLO M, VERBOVEN P, et al. Extending 3D food printing application: Apple tissue microstructure as a digital model to create innovative cereal-based snacks[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 316: 110845.
- [36] 俞克波. 一种含玉米秸秆 3D 打印材料的制备方法: CN108440982A[P]. 2018-05-04.
- YU Ke-bo. A preparation method of 3D printing material containing corn stalks: CN108440982A[P]. 2018-05-04.
- [37] 褚忠, 沈睿, 景晓伟, 等. 一种 3D 打印面塑材料及其制备方法: CN110305493A[P]. 2019-07-15.
- CHU Zhong, SHEN Rui, JING Xiao-wei, et al. A 3D printing surface plastic material and its preparation method: CN110305493A[P]. 2019-07-15.
- [38] 叶静, 吴鹏, 杨宇辉. 一种打印餐具的 3D 打印机: CN205547314U[P]. 2016-03-23.
- YE Jing, WU Peng, YANG Yu-hui. A 3D printer for printing tableware: CN205547314U[P]. 2016-03-23.
- [39] LIU Z, ZHANG M, BHANDARI B, et al. 3D printing: Printing precision and application in food sector[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 69: 83-94.
- [40] GODOI F C, PRAKASH S, BHANDARI B R. 3D printing technol-

- ogies applied for food design: Status and prospects[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 179: 44-54.
- [41] SHAO Y, CHAUSSY D, GROSSEAU P, et al. Use of microfibrillated cellulose/lignosulfonate blends as carbon precursors: Impact of hydrogel rheology on 3D printing[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(43): 10575-82.
- [42] ZHANG M, VORA A, HAN W, et al. Dual-responsive hydrogels for direct-write 3D printing[J]. *Macromolecules*, 2015, 48(18): 6482-6488.
- [43] KIM H W, BAE H, PARK H J. Reprint of: classification of the printability of selected food for 3D printing: Development of an assessment method using hydrocolloids as reference material[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 28-37.
- [44] AZAM R S M, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Effect of different gums on features of 3D printed object based on vitamin-D enriched orange concentrate [J]. *Food Biophysics*, 2018, 13(3): 250-262.
- [45] VANCAUWENBERGHE V, KATALAGARIANAKIS L, WANG Z, et al. Pectin based food-ink formulations for 3-D printing of customizable porous food simulants[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017, 42: 138-150.
- [46] YANG F, ZHANG M, PRAKASH S, et al. Physical properties of 3D printed baking dough as affected by different compositions[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 49: 202-210.
- [47] MANIGLIA B C, LIMA D C, MATTA JUNIOR M D, et al. Preparation of cassava starch hydrogels for application in 3D printing using dry heating treatment (DHT): A prospective study on the effects of DHT and gelatinization conditions[J]. *Food Research International*, 2020, 128: 108803.
- [48] XU K, ZHANG M, BHANDARI B. Effect of novel ultrasonic-microwave combined pretreatment on the quality of 3D printed wheat starch-papaya system[J]. *Food Biophysics*, 2020, 15(2): 249-260.
- [49] KIM H W, BAE H, PARK H J. Classification of the printability of selected food for 3D printing: Development of an assessment method using hydrocolloids as reference material[J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 215: 23-32.
- [50] ZHANG L, LOU Y, SCHUTYSER M A I. 3D printing of cereal-based food structures containing probiotics [J]. *Food Structure*, 2018, 18: 14-22.
- [51] LIU Y, LIANG X, SAEED A, et al. Properties of 3D printed dough and optimization of printing parameters [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 54: 9-18.
- [52] SEVERINI C, AZZOLLINI D, ALBENZIO M, et al. On printability, quality and nutritional properties of 3D printed cereal based snacks enriched with edible insects[J]. *Food Research International*, 2018, 106: 666-676.
- [53] SIVARAMAKRISHNAN H P, SENGE B, CHATTOPADHYAY P K. Rheological properties of rice dough for making rice bread[J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 62(1): 37-45.
- [54] TURABI E, SUMNU G, SAHIN S. Rheological properties and quality of rice cakes formulated with different gums and an emulsifier blend[J]. *Food Hydrocolloids*, 2008, 22(2): 305-312.
- [55] ANUKIRUTHIKA T, MOSES J A, ANANDHARAMAKRISHNAN C. 3D printing of egg yolk and white with rice flour blends[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 265: 109691.
- [56] LIU Y, TANG T, DUAN S, et al. Applicability of rice doughs as promising food materials in extrusion-based 3D printing[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(3): 548-563.
- [57] LIPTON J I, CUTLER M, NIGL F, et al. Additive manufacturing for the food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 43(1): 114-123.
- [58] PULATSU E, SU J W, LIN J, et al. Factors affecting 3D printing and post-processing capacity of cookie dough[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 61: 102316.
- [59] SAHA D, BHATTACHARYA S. Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: A critical review [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2010, 47(6): 587-597.
- [60] KIM H W, LEE I J, PARK S M, et al. Effect of hydrocolloid addition on dimensional stability in post-processing of 3D printable cookie dough[J]. *LWT*, 2019, 101: 69-75.
- [61] LEE J H, WON D J, KIM H W, et al. Effect of particle size on 3D printing performance of the food-ink system with cellular food materials[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 256: 1-8.
- [62] FAN Y, MIN Z, SANGEETA P, et al. Physical properties of 3D printed baking dough as affected by different compositions[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, 49: 202-210.
- [63] FAN Y, MIN Z, BHESH B. Recent development in 3D food printing[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(14): 3145-3153.