

3D 打印技术在食品纹理设计中的研究进展

区穗玲 谢梓红

(广东工商职业技术大学, 广东 肇庆 526020)

摘要:食品纹理是影响消费者接受度的关键因素。随着消费者对个性化和健康营养需求不断提升,传统食品加工方式在纹理调控和多样化质地呈现方面逐渐显现技术瓶颈。3D 打印以其灵活与定制化特点,为食品纹理设计提供了新路径。文章综述了通过材料调控、结构建模及设备优化,3D 打印可实现个性化口感与质地优化;分析了 3D 打印技术在产品烹饪适应性、食品安全保障及消费者接受度等方面所面临的主要挑战,并提出了相应的解决思路。

关键词:食品 3D 打印;纹理设计;个性化营养;智能制造

Research progress of 3D printing technology in food texture design

Ou Suiling Xie Zihong

(Guangdong University of Business and Technology, Zhaoqing, Guangdong 526020, China)

Abstract: Food texture is a key factor influencing consumer acceptance. With the growing demand for personalized and health-oriented diets, the technical bottlenecks of traditional food processing methods have gradually become apparent in texture control and diversified texture presentation. Owing to its flexible and personalized characteristics, 3D printing offers a novel approach for food texture design. This paper reviews the textures that can be personalized and optimized by 3D printing through material modulation, structural modeling, and equipment optimization. Furthermore, this paper analyzes the challenges faced by this technology, including cooking adaptability, food safety assurance, and consumer acceptance, proposing corresponding solutions.

Keywords: food 3D printing; texture design; personalized nutrition; intelligent manufacturing

随着大众对食品个性化消费、营养健康的关注日益提升,传统食品加工方式在纹理调控与多样化质地呈现方面逐渐显露出技术瓶颈。食品纹理不仅是食品物理属性的体现,更是消费者通过触觉、视觉等多重感官综合感知的重要因素^[1]。如“酥脆”“柔滑”“细腻”等质地描述,直接影响大众对食品的第一印象与喜好程度^[2]。对于普通消费者而言,食品的质地不仅关乎食用时的愉悦感,更影响整体的感官体验与满意度。而对于老年人、儿童以及吞咽障碍患者等特殊人群,食品纹理特性则与食品的安全性、适口性及营养摄入效率密切相关,是保障其正常饮食行为的重要前提^[3-5]。

3D 打印技术,又称增材制造(AM)、实体自由成形制造(SFF)或快速成型(RP)^[6-8],是一种通过逐层堆积材

料、将数字模型转化为实体结构的制造方式。凭借其高度的设计灵活性、多材料兼容性和个性化制造能力,3D 打印技术已被应用于航空航天、电子、建筑、医疗^[9-11]等多个领域。在食品领域,纹理设计正逐渐成为食品 3D 打印技术的重要优势。纹理设计不仅直接影响消费者的咀嚼感受与食用愉悦度,还在提升特殊人群食品适口性方面发挥着关键作用。借助 3D 打印技术可对食品内部的微观结构进行精准设计与调控,如控制填充率、孔隙形态、层层排列方式等,从而实现对食品硬度、弹性、脆性、黏附性等质构参数的多尺度调节^[12]。同时,多材料协同打印、结构梯度构建以及智能算法的引入,不仅增强了对食品内部结构的调控能力,也进一步推动了纹理特性的功能化、个性化与可量化调控的实现。特别是在功能性营养

基金项目:肇庆市哲学社会科学规划课题(编号:25GJ-248)

通信作者:区穗玲(1982—),女,广东工商职业技术大学副教授,博士。E-mail:ousuiling@163.com

收稿日期:2025-08-04 **改回日期:**2026-02-07

引用格式:区穗玲,谢梓红. 3D 打印技术在食品纹理设计中的研究进展[J]. 食品与机械, 2026, 42(8): 234-241.

Citation: Ou Suiling, Xie Zihong. Research progress of 3D printing technology in food texture design[J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 234-241.

食品新兴领域,3D 打印技术为开发“质地可控”“口感优化”的替代食品提供了有力支撑,为未来食品工业的高质量、精细化发展提供了新的技术路径。

文章拟系统梳理食品 3D 打印技术的类型、基本原理、原料特性及其应用优势,重点探讨该技术在材料层面、结构建模层面及设备控制层面开展食品纹理设计的关键策略,并进一步总结当前食品 3D 打印在纹理构建过程中所面临的主要挑战及相应的应对路径,旨在为未来新型食品纹理的精准设计与智能制造提供依据。

1 3D 打印食品纹理设计技术概述

1.1 食品纹理设计需求

食品纹理指食品在口腔中被感知的物理结构与力学特性的总和,是决定食用体验的关键感官属性^[13]。该定义不仅包含口腔感知,还涵盖人类通过触觉和视觉等多模态感官系统对食品结构的综合评估。Hemsley 等^[14]研究表明,个体对食品纹理的感知与偏好存在显著差异,尤其在易感人群(如老年人和吞咽困难患者)中,不当的纹理设计可能导致误吸或窒息等安全风险。因此,针对此类人群的食品开发需遵循严格的纹理设计框架,以平衡感官体验与安全性。此外,食品纹理作为消费者决策的核心因素,通过影响感官知觉直接塑造产品预期,进而推动购买行为^[15]。Jansson-Boyd 等^[16]指出,消

费者对食品健康性的判断受视觉隐含表面纹理的显著影响,如甜食产品若呈现“非健康”外观,可能被感知为更美味,从而提升购买意愿,揭示了感官营销中纹理设计与消费者心理的复杂交互作用。因此,食品纹理设计作为连接食品科学、工程学与消费心理学的重要因素,其核心价值在于通过多模态感官调控实现安全性与愉悦性的协同优化。未来研究应着重开发个性化营养需求的纹理调控技术,通过多学科交叉融合推动健康饮食行为的形成,为特殊膳食需求群体提供更精准的食品解决方案。

1.2 食品 3D 打印技术与材料

1.2.1 食品 3D 打印技术种类 挤出式食品 3D 打印是目前应用最广泛的食品打印技术之一,其基本原理是通过机械或气压驱动系统,将具有一定流变性能的食品材料从喷嘴中连续挤出,按照预设的三维路径逐层沉积,最终构建出具有特定形状与结构的食品产品^[17]。喷墨式食品 3D 打印是一种基于液滴喷射原理的增材制造方式,其基本原理是通过控制微型喷嘴将微量的食品墨水以液滴形式按需沉积于基底表面,逐层构建三维结构或表面图案^[18]。激光烧结式食品 3D 打印是一种基于高能激光束选择性加热原理的成型技术,通过使粉末材料在局部熔融或黏结,实现食品结构的逐层构建^[19]。不同食品 3D 打印方式的适用特征与技术潜力各不相同,如图 1 所示。

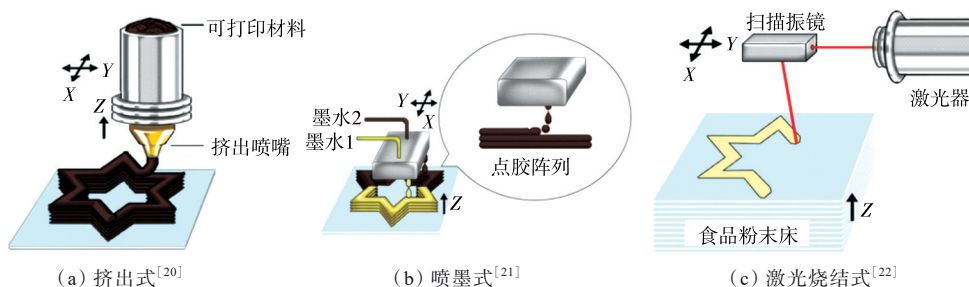


图 1 不同食品 3D 打印技术

Figure 1 Different food 3D printing technologies

1.2.2 食品 3D 打印原料种类 食品 3D 打印原料是构建三维结构和实现功能特性的物质基础,其物理化学特性直接影响打印成型的可行性、稳定性及最终产品的纹理表现。理想材料应兼顾流变性能与感官品质,根据其主要成分特性,食品 3D 打印材料可分为天然可打印原料、流变性能改良原料和可替代新型原料。

天然可打印原料是指无需经过物理或化学改性,天然状态下即具备良好流变性能、可挤出性和成型稳定性,可直接用于食品 3D 打印的原料体系^[23]。此类材料通常表现出一定的黏弹性、剪切稀化性或凝胶性,能够在打印过程中保持沉积精度与层间稳定性。常见天然可打印材

料包括马铃薯泥、南瓜泥、香蕉泥等果蔬类原料,以及巧克力酱、可可脂、奶酪、蜂蜜等半固态脂质类体系。这类原料普遍具有较高的含水量和黏弹性,能够在打印过程中保持良好的挤出连续性与层间稳定性。除果蔬与脂质体系外,谷物类原料也是天然可打印食材的重要代表。其所含淀粉与蛋白质可在混合与受热过程中形成黏弹性网络结构,为打印成型提供支撑性与形状保持力。Lille 等^[24]以全麦黑麦粉为原料进行 3D 打印研究,该类体系在打印过程中均表现出适宜的流变特性和结构稳定性,所得制品较传统高密度饼干具有更低的填充密度与更大的表面积,有利于烘焙过程中水分蒸发与气泡释放,从而有

效避免因热膨胀造成的坍塌变形。这些原料加工简便、营养价值高且口感天然,适用于构建多孔结构、填充型食品或儿童及老年人专属食品,是食品 3D 打印技术初期研究与应用的重要基础。随着 3D 打印技术向多材料协同、多感官调控方向发展,天然材料正成为功能化与定制化食品的重要打印介质。

在食品 3D 打印过程中,尽管部分天然不可打印原料在营养与风味方面更具有优势,但由于其自身存在流动性差、黏附性弱、沉积精度低等问题,往往难以满足打印过程中的成型稳定性与结构完整性要求。为提升材料的可打印性,通常引入具备流变性能调控功能的辅助原料或调整原料比例,对食品墨水体系进行优化调配。Liu 等^[25]通过在卡拉胶基体系中引入淀粉与黄原胶,显著提高了打印油墨的屈服应力、剪切稀化程度、黏度与复数模量,增强了其挤出性、结构恢复能力及成型后的自支撑性。潘禹希等^[26]在鱼糜体系中添加约 12% 的淀粉后,体系的黏弹性和凝胶强度显著提高,打印出的仿蟹肉结构层次清晰,稳定性良好。Pant 等^[27]发现,蔬菜原料的水分与淀粉比例决定了体系的黏弹行为与可打印性,适量添加亲水胶体可有效改善其流动与固化特性,实现结构稳定的打印成型。该类原料已成为食品 3D 打印中构建复杂质地、强化功能结构以及实现高保真度打印效果的关键角色,在功能化食品开发、适口性优化及营养设计等领域发挥着不可替代的重要作用。

在全球食品系统面临资源紧张、环境污染与人口增长多重挑战的背景下,开发可持续、高营养、低碳足迹的替代性食品原料正成为食品科技的重要研究方向^[28]。当前具有代表性的可替代性新型原料主要包括昆虫粉、藻类、真菌蛋白、人造肉、细胞培养肉等。Chaimung 等^[29]指出,昆虫蛋白的高黏度和较强的结构恢复能力有助于打印层的自支撑。Bisht 等^[30]发现,微藻蓝蛋白具有优异的黏弹特性,可增强打印油墨的成型稳定性。Wang 等^[31]将豌豆分离蛋白与鸡糜复配,利用两种蛋白质间的相互作用提高了油墨的流变强度与纤维结构的可控性,成功打

印出具有明显纹理的人造肉制品。可替代性新兴原料在食品 3D 打印中展现出广阔的前景,既提升了原料利用效率和产品功能性,又促进了绿色可持续食品体系的构建,具有重要的应用价值和发展潜力。

1.3 3D 打印食品纹理设计优势

食品 3D 打印技术在纹理设计方面展示出高度的灵活性和精确性。通过数字化控制和逐层构建,3D 打印不仅可实现传统加工难以达到的复杂微观结构,还能按需定制软硬度、密度和层次感,满足不同人群的营养和感官需求。相比传统加工方法,食品 3D 打印在纹理可控性、结构多样性和材料适配性等方面具有明显优势(见表 1)。食品 3D 打印技术凭借其数字化、可编程的构建方式,突破了传统加工在纹理调控上的局限,不仅实现个性化结构设计和精细口感控制,也为多样化原料的高效利用提供了技术支撑。这一技术优势为满足特殊人群营养需求、提升食品体验感及推动食品工业创新提供了坚实基础。

2 3D 打印技术在食品纹理设计中的应用

2.1 基于材料配方设计的纹理调控

在食品 3D 打印中,原料的物理、化学与流变特性直接决定了其可打印性与成型纹理表现。材料层面的纹理设计策略主要通过优化黏度、调控配方结构、层间黏附与支撑性,从而实现期望的质构效果与口感体验。流变性能是实现打印结构稳定性和纹理形成的基础,理想的打印材料应具备剪切稀化行为,便于顺利挤出,同时在挤出后迅速回复一定的结构强度以维持形状。黏度过高会造成喷嘴堵塞,过低则导致结构坍塌。为实现最佳纹理,一般通过添加水凝胶类物质调控其流变性能。Jeong 等^[36]通过构建涵盖 150 种 3D 打印水凝胶的流变—适印性数据库,并引入大振幅振荡剪切(LAOS)等非线性流变指标以及图像分析方法,有效量化了打印纹理的一致性与结构稳定性。结合随机森林回归模型,实现了误差<10% 的打印性能精准预测。该成果为水凝胶配方的优化、食品纹理的可控设计以及可打印功能材料的开发提供了坚实

表 1 食品 3D 打印优势详情表
Table 1 Advantages of food 3D printing

优势类别	传统食品加工方式	食品 3D 打印	参考文献
结构可控性	难以形成规则多孔结构,内部质构不均	可精确控制孔隙率、层厚与排列方式,实现多层次结构构建	[32]
软硬度与弹性调节	仅能通过配方或加热调控,局部差异难实现	通过打印路径和填充率设计实现软硬梯度与弹性可调	[33]
微观纹路与表面质感	传统工艺难以形成复杂表面纹理	可通过模型设计获得特定表面纹理和视觉层次感	[34]
质构一致性与重复性	易受人工加工偏差影响	数字化控制实现高精度成型与质构稳定性	[6]
多材料协同质构设计	不同材料难以在空间上精确分布	多喷头协同打印可实现复合质地与多感官体验	[35]

的理论依据。材料配方设计应兼顾营养价值与结构功能性。如蛋白质含量高的原料有助于构建稳定网络结构,形成富有弹性和层次的纹理^[37];而富含多糖的材料则有利于提供黏合力和凝胶性能^[38]。通过蛋白-多糖复合体系设计,可实现软硬度调控、咀嚼感分层、气孔分布可控等效果。此外,还可通过调节含水量、pH 值、油脂比例等参数,进一步影响材料的孔隙结构和口感表现。Jiang 等^[39]发现,适宜的水相比比例有助于优化孔隙结构与口感表现,pH 调节可增强聚合物间作用力提升凝胶强度,而油脂比例则显著影响体系的流变性能与稳定性。食品 3D 打印材料层面的纹理设计不仅依赖于基础的流变调控,还需综合考虑营养功能、结构稳定性与感官表现等多重因素。通过材料组分优化和参数调节相结合,不仅提升了打印的可行性与质量控制水平,也为实现高效、个性化的食品纹理构建提供了科学支撑和实践路径。

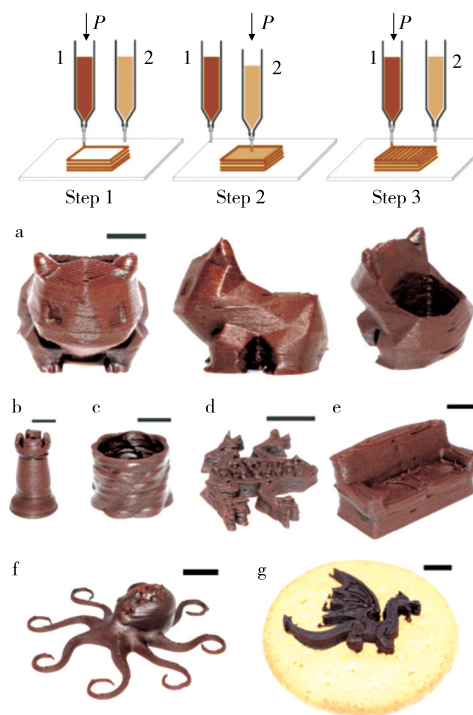
2.2 基于结构模型设计的纹理调控

在食品 3D 打印中,纹理设计不仅取决于原材料性能的调控,更依赖于高精度的模型构建与打印路径规划,从而在微观结构层面实现对目标质构的空间重建与表达。首先可借助计算机辅助设计具备多孔、多层次的数字模型,以实现定制化的软硬交错结构。Derossi 等^[40]通过数字建模构建不同孔隙率与几何结构的谷物零食模型,利用 3D 打印技术实现高精度生产,在结构建模与层级构建方面取得显著成果,将孔隙率从 5% 提升至 25%,使产品硬度由 289 N 显著降至 84 N,证明了可控孔隙设计在质构调控中的有效性。不同的打印路径也会直接影响层间结合强度、整体支撑性与最终质构表现。而采用交错堆积与变速路径设计可有效提升结构稳定性,形成更紧凑或更富弹性的纹理结构。Abdollahi 等^[41]采用平行打印路径可在宏观尺度上形成各向异性纹理,使食品在不同方向表现出不同的咀嚼阻力;而交叉打印路径则有助于构建各向同性纹理,增强整体质地的一致性。此外,通过将打印路径方向在 X、Y 和 Z 轴上进行有策略的组合,成功实现了产品内部不同区域的纹理定制化。未来,还可结合有限元分析(FEA)、流变仿真或人工智能算法对模型打印后的形变、孔隙演变和机械响应进行预测,为纹理功能的迭代优化提供技术保障。Fan 等^[42]结合计算机视觉系统与人工神经网络(ANN),建立了一种通过表面图像预测挤压食品质地特性的方法,为后续食品 3D 打印质量控制提供了一种有效的方案。Liu 等^[43]通过调控 3D 打印土豆基食品的填充率与内部图案结构,系统分析了打印参数对产品质地及空气炸制过程中的结构稳定性的影响。并从结构设计角度揭示了内部孔隙分布与质构响应之间的耦合关系,为后续通过模拟预测和模型优化实现打印食品纹理可控提供了试验基础。在模型层面,通过数字建模

与打印路径设计,可有效推动食品纹理的精准调控和智能化实现,结合先进仿真和智能算法,为高质量、多样化的 3D 打印食品开发奠定坚实基础。

2.3 基于打印设备优化的纹理调控

食品 3D 打印的设备性能和功能直接影响最终产品的纹理质量和结构稳定性。在设备层面,纹理设计策略主要通过改变喷嘴结构进行食品质地调控。多喷头协同打印技术支持多材料、多颜色的同步沉积,丰富了纹理的多样性和视觉感受。Karyappa 等^[44]利用多喷头挤出装置,分别将巧克力糖浆、糊状物和含有 5%~25% 可可粉的混合物装入独立的料仓,通过协同打印制作出一个外层为锥形壳体、内部填充巧克力糖浆的复杂多层结构,实现了巧克力食品的分层纹理设计(见图 2)。此外,还可利用同轴喷嘴进行多材料同轴挤出,实现内外层材料的精准包覆和功能分区,从而进一步丰富食品的结构层次和口感体验。Derossi 等^[45]通过多喷头 3D 打印技术,精确控制巧克力与果蔬粉比例,实现了食品产品的分层渐变色打印。这种方法使产品在外观上呈现出自然的色彩过渡,并显著提升了消费者对产品甜度和新鲜度的主观感知。童强等^[46]研究表明,基于同轴挤出结构的打印方式能够实现益生菌包埋体系的精准构型。当内、外轴挤出速度分别为 1.00, 0.15 mm/s 时,内外流体在同轴喷头中形成



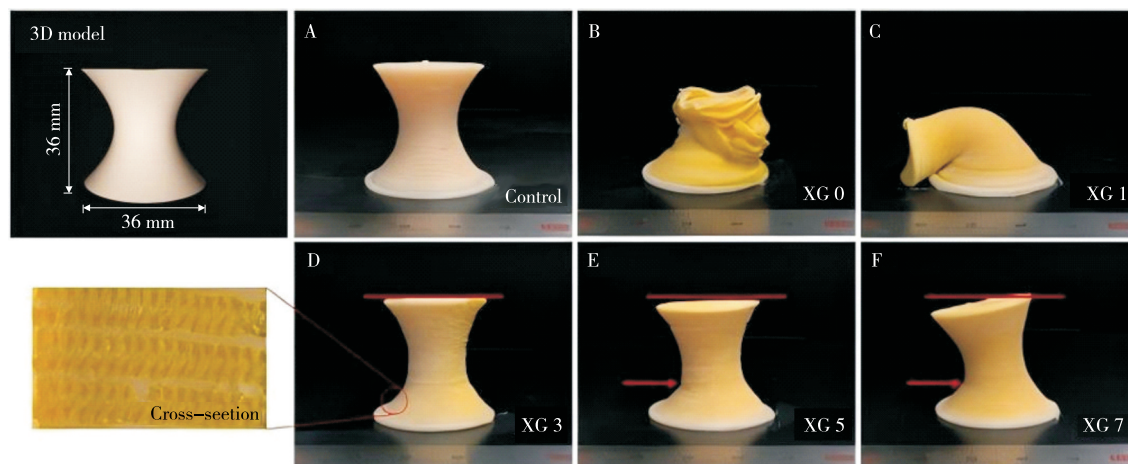
a~g 分别为系统打印的代表性模型

图 2 多材料食品 3D 打印设备原理及典型打印结构^[44]

Figure 2 Principles and typical printing structures of multi-material food 3D printing equipment

稳定的层流界面,可获得成型完整、界面清晰的益生菌包埋结构。进一步通过在内轴益生菌溶液中加入牛奶、火龙果汁等原料,展示了同轴挤出在多组分、多颜色可视化打印中的应用潜力。Jeon 等^[47]采用同轴 3D 打印技术,将富含抗氧化和抗癌特性的姜黄素纳米乳剂(NFG)与黄原胶(XG)和马铃薯淀粉(PS)混合制成的凝胶作为

内流体,搭配豆沙作为外流体,成功研发出了营养价值极高的豆沙类食品(见图 3)。设备层面的纹理设计策略通过喷嘴结构的创新与多材料协同打印技术的应用,有效提升了食品打印的结构精度、功能分区能力与质构多样性,为实现个性化、功能化食品的高质量生产提供了关键支持。



A 为未添加 NFG 的壳基体打印情况;B~F 分别含有 0%,1%,3%,5% 和 7% XG 的打印情况

图 3 同轴 3D 打印^[47]

Figure 3 Coaxial 3D printing

3 3D 打印食品纹理设计的技术挑战与未来方向

3.1 打印食品烹饪问题

由于打印食品往往具有较为精细、层层堆积的结构,其在加热过程中容易出现局部水分蒸发不均、热应力积累等问题,导致产品出现断裂、塌陷或破碎等现象,严重影响其感官质量和食用体验^[48]。激光加工作为“快速、精准”加工的典型代表,能够在原料挤出的瞬间实现局部点加热,不仅可诱导肉蛋白的热变性,还可精准控制其变性程度和作用区域,从而实现对质构结构的快速调控,有效降低产品在加热过程中的变形风险。Blutinger 等^[49]采用选择性激光加热技术对鲑鱼进行烹饪,成功实现在 1~3 mm 厚的鲑鱼切片中完成全蛋白质变性,其工作原理如图 4 所示。采用摆线式激光路径可实现理想的质构效果并符合食品安全要求的烹饪温度。Blutinger 等^[50]利用多波长激光对 3D 打印食品进行固化,进一步实现了对食品的精准烹饪。将 3D 打印技术与软件控制的激光系统结合,成功将烹饪过程数字化。通过在时间和空间维度上精准控制食材的排列和热量分布,利用不同波长的激光对鸡肉进行照射,探索出一种实现肉类精准熟化的新型烹饪方法。激光辅助加热技术凭借其高精度、可控性强等优势,为 3D 打印食品在后处理环节中的质构保持与结

构稳定提供了有效解决方案,是推动食品打印从“成型”向“成菜”迈进的关键一步。

3.2 食品安全问题

随着食品 3D 打印技术逐渐向多材料、复杂结构的纹理方向发展,其食品安全问题也日益受到关注。打印设备中的喷嘴系统,尤其是多喷嘴协同打印装置,在长期使用过程中极易积存残留物。一方面,不同材料在喷嘴中混合沉积,若未及时彻底清洁,极易成为微生物滋生的温床;另一方面,由于喷头结构复杂、内部狭窄,传统的人工

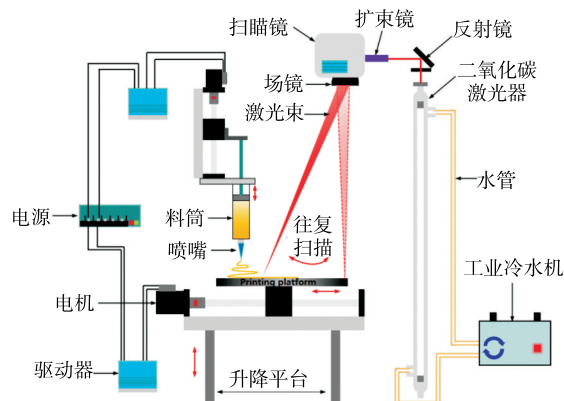


图 4 选择性激光烹饪食品 3D 打印系统示意图^[49]

Figure 4 Selective laser cooking food 3D printing system

或外部清洗方式难以实现彻底消毒,存在潜在的交叉污染和食品安全隐患^[51]。针对这一问题,自清洗系统正逐渐成为解决方案之一。Wu 等^[52-53]设计了两种智能快速喷头清洁控制系统,采用环保清洁材料和超声波清洗技术,在保证喷嘴不受损害的情况下,可有效去除堵塞物,显著提升 3D 打印机的卫生安全。总之,提升打印设备的清洁便利性与自洁能力,是保障食品 3D 打印过程卫生安全的关键方向之一,也是实现其商业化和日常化应用的重要前提。

3.3 消费者接受度

食品 3D 打印作为一种新兴技术,虽然在个性化定制和创新食品设计方面展现出巨大潜力,但消费者接受度和市场认知仍是其推广应用的关键瓶颈之一。Lupton 等^[54]研究发现,公众对以实验室培育肉或昆虫蛋白为原料的 3D 打印肉类替代品的接受程度受到显著的情感因素干扰。消费者普遍对实验室培育肉持有认知偏见,而对昆虫原料则存在“令人反感”或“恶心”等情绪性抵触。这些主观偏见在很大程度上影响了其对新型食品技术的认知评价与消费意愿,表明在推动 3D 打印食品普及过程中,需重视情感认知调节与消费心理引导。Turan 等^[55]提出可通过包装设计、品牌命名、广告语等强化“高科技”“未来食品”“健康环保”的形象,减少对“实验室”和“昆虫”的联想。同时,邀请营养专家、知名厨师及环保人士等公众人物进行权威背书,以提升消费者的信任度;此外,建立食品 3D 打印相关的质量安全标准与可视化标识体系,有助于增强产品的专业性与市场公信力,从而提升整体接受度。解决消费者对 3D 打印肉类替代品的心理抵触,不仅需要技术层面的安全保障,更需要情感层面的认知重构。只有将科学传播、感官设计、社会认同和政策推动多维融合,才能有效提升消费者的接受度与市场认知。

4 总结

文中系统梳理了食品 3D 打印的主要类型、原料特性及其在食品纹理设计中的优势。在此基础上,进一步指出该技术在食品纹理设计中的应用策略。在材料层面,优化材料流变性能和配方结构可显著提升打印适应性和纹理表现;在模型层面,借助数字建模与路径设计可实现不同区域的质地定制;在设备层面,多喷头协同与同轴喷嘴技术则增强了多材料打印的结构精度与功能性。食品 3D 打印技术通过材料、模型与设备三位一体的协同优化,为实现食品纹理的精准设计与个性化制造提供了系统化解决方案,展现出在未来食品加工领域的重要发展潜力。尽管该技术在纹理调控、感官优化与营养精准投放方面已取得显著进展,但仍面临后处理稳定性、食品安全及消

费者接受度等挑战。未来可引入激光辅助热处理实现实时质构控制,开发智能喷头清洗系统保障卫生安全,并通过科普与品牌背书提升公众认知。3D 打印在食品纹理设计中的应用前景广阔,未来发展需紧密围绕技术创新、材料优化、感官体验提升及消费者需求等多维度展开。相信在未来,3D 打印技术必将推动食品纹理设计迈向更加个性化与功能化的新时代。

参考文献

- [1] Baingana M. Food texture perception and its influence on consumer preferences[J]. *Journal of Food Sciences*, 2024, 5(2): 43-55.
- [2] 赵之越, 廖梦雨, 聂远洋, 等. 真空油炸香菇脆片烫漂和浸渍工艺优化[J]. *食品与机械*, 2025, 41(2): 189-196.
Zhao Z Y, Liao M Y, Nie Y Y, et al. Optimization of blanching and soaking technology for vacuum-fried *Lentinus edodes* crispy [J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(2): 189-196.
- [3] Ross C F. The texture factor: food product development for discrete populations including orally compromised elderly consumers and children with down syndrome[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2023, 58(12): 6 151-6 157.
- [4] Makame J, Nolden A A, Naushad Emmambux M. Texture properties of foods targeted for individuals with limited oral processing capabilities: the elderly, dysphagia, and head and neck cancer patients[J]. *Food & Function*, 2023, 14(9): 3 949-3 965.
- [5] Raheem D, Carrascosa C, Ramos F, et al. Texture-modified food for dysphagic patients: a comprehensive review[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18 (10): 5 125.
- [6] Godoi F C, Prakash S, Bhandari B R. 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 179: 44-54.
- [7] Liu Z B, Zhang M, Bhandari B, et al. Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 76-82.
- [8] 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.
- [9] Derossi A, Caporizzi R, Ricci I, et al. Critical variables in 3D food printing[C]// Godoi F C, Bhandari B R, Prakash S, et al. *Fundamentals of 3D food printing and applications*. Cambridge, MA: Academic Press, 2019: 41-91.
- [10] Keerthana K, Anukiruthika T, Moses J A, et al. Development of fiber-enriched 3D printed snacks from alternative foods: a study on button mushroom[J]. *Journal of Food Engineering*,

- 2020, 287: 110116.
- [11] 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.
 - [12] 王国霞, 李春阁, 武思, 等. 3D 打印技术在保健食品加工应用中的研究进展[J]. *食品与机械*, 2025, 41(6): 236-243.
Wang G X, Li C G, Wu S, et al. Research progress of 3D printing technology in health food processing[J]. *Food & Machinery*, 2025, 41(6): 236-243.
 - [13] Chen J, Rosenthal A. Food texture and structure[M]// *Modifying food texture*. [s.n.]: Woodhead Publishing, 2015: 3-24.
 - [14] Hemsley B, Palmer S, Kouzani A, et al. Review informing the design of 3D food printing for people with swallowing disorders: constructive, conceptual, and empirical problems [C]// *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*. Los Alamitos: IEEE, 2019: 5 734-5 743.
 - [15] Pramudya R C, Seo H S. Hand-feel touch cues and their influences on consumer perception and behavior with respect to food products: a review[J]. *Foods*, 2019, 8(7): 259.
 - [16] Jansson-Boyd C V, Kobescak M. To see is to hold: using food surface textures to communicate product healthiness[J]. *Food Quality and Preference*, 2020, 81: 103866.
 - [17] 童强, 姜宇, 佟焱, 等. 食品 3D 打印中的食品材料特性与应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2023, 39(7): 1-5, 19.
Tong Q, Jiang Y, Tong Y, et al. Research on the characteristics and application of food materials in food 3D printing[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(7): 1-5, 19.
 - [18] Aiso K, Watanabe Y, Shiblee N I, et al. Food 3D printing with starch suspension[J]. *ECS Meeting Abstracts*, 2021(55): 1 594.
 - [19] Awad A, Fina F, Goyanes A, et al. 3D printing: principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2020, 586: 119594.
 - [20] Sun J, Zhou W, Huang D, et al. 3D food printing: perspectives [M]// *Polymers for food applications*. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018: 725-755.
 - [21] Guo Y, Patanwala H S, Bognet B, et al. Inkjet and inkjet-based 3D printing: connecting fluid properties and printing performance [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23(3): 562-576.
 - [22] Kaur J, Bhadariya V, Singh J, et al. Materials for food printing [M]// *Food printing: 3D printing in food industry*. Springer Singapore: Springer Singapore, 2022: 1-18.
 - [23] Bredihin S A, Antipov S T, Andreev V N, et al. Influence of rheological characteristics on the quality of 3D printing of food pastes[J]. *Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies*, 2021, 83(2): 40-47.
 - [24] Lille M, Kortekangas A, Heiniö R L, et al. Structural and textural characteristics of 3D-printed protein- and dietary fibre-rich snacks made of milk powder and wholegrain rye flour[J]. *Foods*, 2020, 9(11): 1 527.
 - [25] Liu Z B, Bhandari B, Prakash S, et al. Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 413-424.
 - [26] 潘禹希, 于婉莹, 赵文宇, 等. 鲢鱼糜和海参复配 3D 打印食品材料[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 175-183, 30.
Pan Y X, Yu W Y, Zhao W Y, et al. 3D printing food materials made with hypophthalmichthys molitrix surimi and sea cucumber pulp[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(8): 175-183, 30.
 - [27] Pant A, Lee A Y, Karyappa R, et al. 3D food printing of fresh vegetables using food hydrocolloids for dysphagic patients[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 114: 106546.
 - [28] Liu F G, Li M T, Wang Q K, et al. Future foods: alternative proteins, food architecture, sustainable packaging, and precision nutrition[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2023, 63(23): 6 423-6 444.
 - [29] Chaimung C, Liou S. The potential of 3D food printing to promote the circular insect supply chain in achieving sustainable development goals[J]. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2024, 11(1): 47-60.
 - [30] Bisht B, Shabaaz Begum J P, Dmitriev A A, et al. Unlocking the potential of future version 3D food products with next generation microalgae blue protein integration: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024, 147: 104471.
 - [31] Wang T X, Kaur L, Furuhashi Y, et al. 3D printing of textured soft hybrid meat analogues[J]. *Foods*, 2022, 11(3): 478.
 - [32] Pereira T, Barroso S, Gil M M. Food texture design by 3D printing: a review[J]. *Foods*, 2021, 10(2): 320.
 - [33] Chao C, Nam H K, Park H J, et al. Potentials of 3D printing in nutritional and textural customization of personalized food for elderly with dysphagia[J]. *Applied Biological Chemistry*, 2024, 67(1): 25.
 - [34] Chauhan P, Kaushal M, Vaidya D, et al. Personalized nutrition to intelligent foods with 3D and 4D printing[J]. *Applied Food Research*, 2025, 5(1): 100863.
 - [35] Hooi Chuan Wong G, Pant A, Zhang Y, et al. 3D food printing-sustainability through food waste upcycling[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 70: 627-630.
 - [36] Jeong E H, Choi J, Park H B, et al. Data-driven printability modeling of hydrogels for precise direct ink writing based on rheological properties[J]. *Advanced Science*, 2026, 13(15): e07639.
 - [37] Rout S, Dash P, Panda P K, et al. Interaction of dairy and plant proteins for improving the emulsifying and gelation properties in food matrices: a review[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2024, 33(14): 3 199-3 212.
 - [38] Yuk H, Girardot C, Aydin G, et al. A data-driven approach to

- model the printability of hydrogel-based inks for extrusion-based 3D printing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 139: 109423.
- [39] Jiang Y, Liu L L, Wang B J, et al. Polysaccharide-based edible emulsion gel stabilized by regenerated cellulose[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 91: 232-237.
- [40] Derossi A, Caporizzi R, Paolillo M, et al. Programmable texture properties of cereal-based snack mediated by 3D printing technology[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 289: 110160.
- [41] Abdollahi M, Nieuwland M, Van Bommel K, et al. Texture engineering of aquatic protein-based products via 3D food printing[J]. *Future Foods*, 2025, 11: 100604.
- [42] Fan F H, Ma Q, Ge J, et al. Prediction of texture characteristics from extrusion food surface images using a computer vision system and artificial neural networks[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 118(4): 426-433.
- [43] Liu Z B, 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.
- [44] Karyappa R, Hashimoto M. Chocolate-based ink three-dimensional printing (Ci3DP) [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1): 14178.
- [45] Derossi A, Spence C, Corradini M G, et al. Personalized, digitally designed 3D printed food towards the reshaping of food manufacturing and consumption[J]. *NPJ Science of Food*, 2024, 8(1): 54.
- [46] 童强, 杨俊豪, 曹燕舞, 等. 基于同轴 3D 打印的益生菌嵌入凝胶成型分析[J]. *食品与发酵工业*, 2026, 52(7): 219-225.
- Tong Q, Yang J H, Cao Y W, et al. Analysis of probiotics embedded gel molding based on coaxial 3D printing[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2026, 52(7): 219-225.
- [47] Jeon W Y, Yu J Y, Kim H W, et al. Production of customized food through the insertion of a formulated nanoemulsion using coaxial 3D food printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 311: 110689.
- [48] 王强, 杜洪振, 徐舰航, 等. 基于肉类原料的 3D 打印技术研究进展[J]. *食品科学*, 2022, 43(1): 353-361.
- Wang Q, Du H Z, Xu J H, et al. 3D printing technology based on raw meat materials: a review[J]. *Food Science*, 2022, 43(1): 353-361.
- [49] Blutinger J D, Meijers Y, Lipson H. Selective laser broiling of Atlantic salmon[J]. *Food Research International*, 2019, 120: 196-208.
- [50] Blutinger J D, Tsai A, Storvick E, et al. Precision cooking for printed foods via multiwavelength lasers[J]. *NPJ Science of Food*, 2021, 5(1): 24.
- [51] Kirchner M, Goulter R M, Chapman B J, et al. Cross-contamination on atypical surfaces and venues in food service environments[J]. *Journal of Food Protection*, 2021, 84(7): 1 239-1 251.
- [52] Wu Y, Wang H, Zheng Z H, et al. Design of the 3D printer nozzle cleaning system[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2 450(1): 012043.
- [53] Wei W, Chen N, Zhang J F, et al. Design of an intelligent rapid nozzle cleaning control system for fused deposition modelling 3D printers[J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2018, 36(2): 704-708.
- [54] Lupton D, Turner B. Food of the future? Consumer responses to the idea of 3D-printed meat and insect-based foods[J]. *Food and Foodways*, 2018, 26(4): 269-289.
- [55] Turan D, Keukens B M, Schifferstein H N J. Food packaging technology considerations for designers: attending to food, consumer, manufacturer, and environmental issues[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2024, 23(6): e70058.