

激光技术在食品3D打印中的应用及发展趋势

童强^{1,2}, 肖帅磊¹, 姜宇¹, 董秀萍^{2,3}, 庞桂兵^{1,*}

(1.大连工业大学机械工程与自动化学院, 辽宁 大连 116034; 2.海洋食品加工与安全控制全国重点实验室, 国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁省海产品精深加工产业共性技术创新平台, 大连市中式预制食品技术创新中心, 辽宁 大连 116034; 3.大连工业大学食品交叉科学研究院, 辽宁 大连 116034)

摘要: 随着食品3D打印技术的快速发展, 各种辅助技术与其结合的创新应用越来越受关注。激光技术具有精确、高能量和快速实现材料成型等特点, 与食品3D打印技术的个性化定制优势高度契合, 两者的结合在食品加工领域展现出巨大的应用前景。本文在介绍食品3D打印技术和激光技术发展现状的基础上, 着重阐述激光技术在食品3D打印中的应用, 包括激光参数(如波长、功率、脉冲等)和工艺优势。同时, 指出激光技术在食品3D打印应用中所面临的挑战, 如激光照射下的食品安全、应用局限等问题。最后, 对激光技术和食品3D打印技术深度融合的发展趋势进行总结与展望, 指明未来发展方向, 为激光技术在食品3D打印领域的创新应用提供理论参考。

关键词: 食品3D打印; 增材制造; 激光技术; 食品加工

Application and Development Trend of Laser Technology in Food 3D Printing

TONG Qiang^{1,2}, XIAO Shuailei¹, JIANG Yu¹, DONG Xiuping^{2,3}, PANG Guibing^{1,*}

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 2. SKL of Marine Food Processing & Safety Control, National Engineering Research Center of Seafood, Dalian Technology Innovation Center for Chinese Prepared Food, Liaoning Provincial Collaborative Innovation Center for Marine Food Deep Processing, Dalian 116034, China; 3. Academy of Food Interdisciplinary Science, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: With the rapid development of food 3D printing technology, its innovative combined application with various auxiliary technologies is attracting more and more attention. Laser technology is characterized by high precision, high energy and rapid material shaping, which matches highly with the personalized customization advantage of food 3D printing technology. The combination of these two techniques shows great application prospects in the field of food processing. This article begins with an introduction to the current development of food 3D printing technology and laser technology, and focuses on the application of laser technology in food 3D printing from the perspectives of laser parameters (such as wavelength, power and pulse) and processing advantages. At the same time, this article points out the challenges facing the application of laser technology in food 3D printing, such as food safety and application limitations. Finally, this article summarizes trends in the deep integration of laser technology and food 3D printing technology and points out future directions so as to provide a theoretical basis for the innovative application of laser technology in the field of food 3D printing.

Keywords: food 3D printing; additive manufacturing; laser technology; food processing

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240325-186

中图分类号: TS203

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2025)01-0315-07

引文格式:

童强, 肖帅磊, 姜宇, 等. 激光技术在食品3D打印中的应用及发展趋势[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 315-321. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240325-186. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2024-03-25

基金项目: 中国博士后科学基金第73批面上项目(2023M730452); 辽宁省教育厅高校基本科研项目(LJKMZ20220895); 辽宁省属本科高校基本科研业务费专项资金资助项目(LJBKY2024002)

第一作者简介: 童强(1989—)(ORCID: 0009-0001-6049-9451), 男, 讲师, 博士, 研究方向为水产品复合3D打印关键技术。

E-mail: tongqiang.work@outlook.com

*通信作者简介: 庞桂兵(1975—)(ORCID: 0000-0003-1595-6112), 男, 教授, 博士, 研究方向为特种精密加工及其相关智能制造技术。E-mail: pangguibingsx@163.com

TONG Qiang, XIAO Shuailei, JIANG Yu, et al. Application and development trend of laser technology in food 3D printing[J]. Food Science, 2025, 46(1): 315-321. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240325-186. <http://www.spkx.net.cn>

3D打印又称增材制造,其核心在于能够根据数字模型进行个性化加工,简化设计制造过程,降低制造业门槛^[1]。自20世纪80年代诞生以来,3D打印经历了从概念验证到小批量生产、再到商业化应用的发展过程,被誉为继个人计算机和互联网之后颠覆传统制造业的第3次工业革命^[2]。近年来,3D打印技术在食品领域也展现出巨大的应用前景,食品3D打印通过精准控制食材配比、温度、成型路径等参数,可以实现对食品形状、营养构成、口感等指标的精确调控。与传统食品加工方法相比,食品3D打印技术更加灵活、高效,展现出定制化生产、成型效率高、材料利用率高等优势。目前,食品3D打印技术已经初步应用于高端餐饮、特殊营养需求人群个性化食品定制等领域,但3D打印成型后的食品往往存在结构稳定性差、打印精度低等问题,这在一定程度上限制了食品3D打印的应用范围^[3-6]。

激光技术的引入为食品3D打印克服上述问题提供了新的解决途径。激光具有精确、快速、无接触等优势,与食品3D打印技术的有机结合可显著提高打印食品的制作效率和成型质量^[7]。随着科技的发展与进步,激光技术在食品3D打印中的应用也在不断增加。例如,支撑材料作为食品3D打印过程中确保打印成型的关键因素之一,如果不去除,将会影响成品的口感和食用体验,而采用激光切除技术可以在不破坏打印食品的情况下,精准去除支撑材料^[8]。此外,激光还可以用于食品熟化加工,可精确控制食品熟化过程中的温度曲线和相变过程,有利于获得更好的口感^[9]。

本文旨在概述激光技术在食品3D打印中的应用,阐述激光参数对3D打印食品的影响及所面临的挑战,推动基于激光技术的3D打印功能性及个性化食品开发和应用,为食品加工的创新发展提供新思路。

1 食品3D打印技术与激光技术概述

1.1 食品3D打印技术概述

3D打印技术作为一种先进制造技术,是以数字模型为基础,通过逐层堆叠材料的方式构建实体的技术。其优势在于快速实现原型设计和小批量生产,突破传统制造业的加工方式,实现从数字化设计到数字化生产的一站式解决方案。经过30余年的发展,3D打印技术已从最初的概念验证阶段逐渐发展成为一个成熟的产业,打印材料范围也从最初的聚合物逐步扩展至包括金属、陶瓷、沙子、生物组织等在内的多种类,并在航空航天、

医疗、汽车等众多领域得到广泛应用,其潜力和影响正在不断扩大,其中之一便是食品加工领域^[10-12]。

食品3D打印技术是将3D打印技术应用于食品领域的一种创新技术,通过数字化精准控制食材配比、温度、打印路径等参数,以食材逐层堆叠的方式构建出所需形状的食品^[13]。与传统食品加工不同,食品3D打印不仅能精准控制打印过程中的各个参数,为特殊人群定制个性化食品,还能够充分提高材料利用率,减少原材料浪费。目前,食品3D打印已经初步应用于食品设计(图1)^[14-15]。随着技术的不断发展,打印材料种类的扩展、打印速率的提升及设备成本的降低必将推动食品3D打印在食品工业中的大规模应用和数字化产线的转变。



图1 肉蛋白食品3D打印的应用领域^[15]

Fig. 1 Application areas of meat protein food 3D printing^[15]

1.2 激光技术概述

激光是指透过刺激原子导致电子跃迁释放辐射能量而产生的具有同调性的增强光子束,根据波长范围,常见的激光可分为可见光激光、红外激光和紫外激光等^[16]。激光起源于20世纪60年代,美国物理学家Theodore H. Maiman发明了红宝石激光器,获得了波长为0.694 3 μm 的激光^[17]。随后,各种固体激光、气体激光、半导体激光、化学激光等应运而生。现今激光技术已经成为现代科学技术发展的重要组成部分,广泛应用于工业制造、食品加工、信息通信、生物医药、科研、军事等诸多领域^[18-19]。特别是食品加工领域,激光技术被广泛应用于食品检测、加工及包装等多个方面^[20-22]。相较于普通光源,激光拥有更好的单色性、指向性和相干性,这些特性使激光光能可以集中在一个光点上,且不会对临近区域产生过度影响,实现精准加工^[23]。此外,激光是一种非接触加工技术,可大大减少目标材料被污染的可能。

近年来,激光技术与食品3D打印的结合研究逐渐成为热点。食品3D打印是一种将三维建模、机电控制、食品科学等诸多跨学科知识融于一体而形成的先进制造技术,其具有个性化和自由定制、营养配比精准控制、可满足不同类型人群食用需求等特点^[24]。目前,激光技术在食品3D打印中的应用主要有2种,一是选择性激光烧结食用级粉末^[25];二是借助食品3D打印机直接打印预设食品形状(如鱼糜、虾糜等肉蛋白基材)^[26]。但传统的食品3D打印面临一个关键性挑战,因打印的食材不可直接食用,且打印过程中浆料沉积成型,受重力及其本身流变特性的影响,会出现坍塌、流淌等成型问题,如图2所示。激光技术为这一难题提供了潜在的解决方案。激光技术通过高度精密的焦点和集中的能量,能够对食材逐层精准加工成型,相较于传统热源,激光在加热和成型过程中更为精确,能够提高食品的成型质量。同时,激光技术的高速成型特性有望缓解食品3D打印速率慢的问题,为实现大规模定制食品生产提供可能。

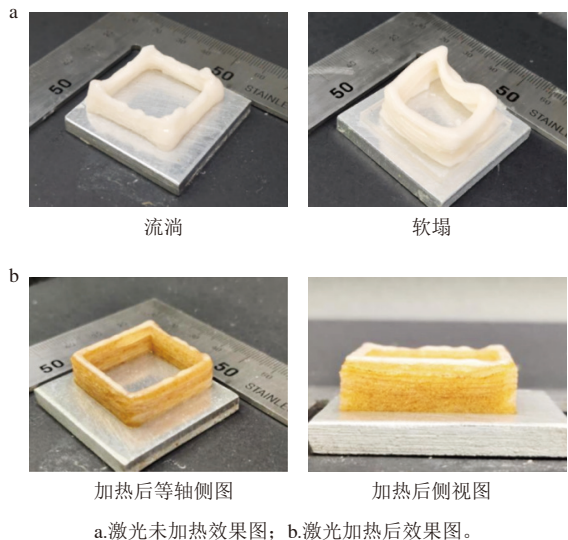


图2 激光照射3D打印前后对比示意图

Fig. 2 Comparison diagram of 3D printing before and after laser irradiation

2 激光技术在食品3D打印中的应用

2.1 激光参数对食品3D打印的影响

激光参数(包括波长、功率、脉冲等)决定了激光与食材间能量传递和相互作用的方式,这直接影响食品3D打印的成型质量,如表1所示。根据不同食材类型选择合适的激光参数,才能实现食品3D打印过程中的精确控制,从而实现食材均匀加热与稳定成型。

表1 激光参数对食品3D打印的影响

激光参数	对食品3D打印的影响	参考依据	参考文献
波长	短波长激光会被食品表层吸收,而长波长激光(如CO ₂ 激光)能深层渗透	食材的穿透深度需求,不同波长对各食材组织的作用机制	[27-29]
功率	功率过低会导致食材无法完全烹饪,过高会破坏食材组织	食材的热容量和大小	[30]
脉冲	高脉冲可以加快熟化速率,低脉冲能提高打印精度,但熟化速率会受到影响	食材加工精细度要求	[31]
光斑直径	光斑直径过小会降低打印速率,过大无法精细控制	食材细节结构和打印精度要求	[32-34]
扫描速率	扫描过快,食材无法完全成型,过慢会过度加热	食材层厚、激光功率等参数	[35-38]

2.1.1 波长

激光波长是影响食品3D打印的关键因素之一,它直接影响激光的穿透深度和吸收性能,进而影响食品3D打印的成型效果。Aiso等^[39]使用淀粉悬浮液作为打印材料打印金字塔形状,用蓝色激光($\lambda=450\text{ nm}$)进行照射后发现,3D打印的金字塔结构比原始设计的金字塔数据大,这可能是糊化淀粉在3D打印过程中及之后吸收水分并膨胀。在另一项研究中,Blutinger等^[40]发现蓝色激光($\lambda=445\text{ nm}$)能够促进1 mm厚面团中的淀粉完全糊化,将面团样品反复暴露于高频率蓝色激光下,并保证足够的暴露间隔时间,使热量在样品内积累,是使面团内部达到所需温度最有效的方法。此外,Blutinger等^[41]还开发了一种使用多波长激光通过定制软件驱动模式进行印刷食品精确烹饪的方法,将鸡肉在蓝色激光($\lambda=445\text{ nm}$)、近红外(near-infrared, NIR)激光($\lambda=980\text{ nm}$)和中红外激光($\lambda=10.6\text{ }\mu\text{m}$)下烹饪发现,红外激光可比蓝色激光更有效地促进食物发生褐变,NIR激光能够透过包装对食物进行烹饪,促使其褐变,且激光烹饪损失率比烤箱降低50%,鸡肉的口感也更加细腻、柔嫩。该研究将软件集成到烹饪过程中,这将促进更具创新性的食品设计发展,实现个性化定制食品,并为不断扩大的食品3D打印行业开拓新的市场。

2.1.2 功率

激光功率直接影响食品材料的熔融或固化速率,从而影响打印出的食品质构和形态。Chao等^[42]探究785 nm波长激光对奶粉、玉米淀粉和小麦粉3种不同食品粉末的穿透深度,并探究激光功率(100、200、300 mW)对穿透深度的影响,发现785 nm激光源能够轻松穿透3种食物样本中1 mm深度的每个点,激光可以穿透的点数随食品粉末深度的增加而减少,并且激光功率显著影响穿透深度,该研究为食品3D打印中激光功率的选择提供了参考。此外,激光还能够抑制微生物的生长与繁殖。Gonca等^[43]研究二极管激光(包括激光类型、照射时间、功率密度、激光穿透效率和生物膜印制等参数)对大肠杆菌(ATCC 10536)、金黄色葡萄球菌和白色念珠菌等病原微生物的影响,结果发现,蓝色激光比红色和绿色激光更有效,在激光功率密度0.36 W/cm²条件下,蓝色激光照射15 min对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和白色念珠菌的

抑制率分别为65.90%、34.52%和43.63%；蓝色激光照射30 min对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和白色念珠菌的抑制率分别为85.39%、41.18%和54.55%。在激光功率密度 0.54 W/cm^2 条件下，蓝色激光成功对废水和牛奶进行灭菌，这一发现为优化3D打印食品的安全性提供了重要参考。

综上，不同功率的激光对食品粉末的穿透性能不同，激光强度越高，对食品粉末的穿透深度越大。此外，适当提高激光功率还可起到抑菌或灭菌作用。因此，为获得理想的3D打印食品，需针对不同食材选取合适的激光功率。

2.1.3 脉冲

脉冲作为激光的重要参数之一，对食品感官特性（颜色、质地和风味等）有显著影响。Fine等^[44]采用脉冲紫外光处理后，黑胡椒和小麦粉颜色发生不良变化。Gómez-López等^[45]发现，经过强光脉冲（持续时间30 μs 、脉冲强度7 J、距离12.8 cm）处理后，卷心菜和生菜立即变色，散发出类似塑料的异味。由此可见，当脉冲达到一定强度时，可能会导致食品质量劣变。此外，Wambura等^[46]研究脉冲紫外光对火腿品质的影响，将100 g生火腿样品（厚5 mm）在紫外光系统中处理60、90、120 s，与灯中心轴线的距离分别为4.5、8.3、14.6 cm，以100 g未处理的样品作对照。结果表明，火腿在加工和贮藏7 d后，颜色变深，肉质硬度下降，且样品的颜色和质地与处理时间、光源距离呈负相关。

综上，脉冲对食物颜色、质地和风味有显著影响，选择合适的脉冲处理可以实现更精准的食材变性，提高食物口感。未来，需要研究不同脉宽和峰值功率下脉冲激光的加工特性，并优化脉冲参数，以实现对各类食材的精准控制，进一步发挥激光技术在食品3D打印中的应用潜力。

2.1.4 其他参数

除了波长、功率和脉冲等参数外，激光的聚焦特性和扫描速率也是影响食品3D打印质量的关键因素。其中，光斑直径是激光聚焦特性的关键参数之一，光斑直径过小会导致局部糊化，而光斑直径过大则无法提供足够高的能量密度。如Diaz等^[47]使用激光光斑直径为0.6 mm的 CO_2 激光器和特定的工艺参数（层距0.1 mm、速率1 250 mm/s、激光功率50%、层厚0.3 mm）执行激光选区烧结（selective laser sintering, SLS）程序，成功得到了色彩丰富且可食用的食品。较大的激光光斑直径可确保结构不易破裂，但会导致最终产品的精度和分辨率降低，而较小的激光光斑可以提高打印分辨率和精度，但会降低打印速率^[48]。

此外，激光的扫描速率也会影响最终的食品3D打印效果，扫描过快会导致打印无法成型，而过慢会过度加热。Tong Qiang等^[49]在激光烧结3D打印鱼糜制品单线条

模拟仿真实验中，探究激光扫描速率（100、200、300、400、500、600 mm/s）对3D打印效果的影响。结果表明，激光扫描速率为100 mm/s时，扫描线条上的鱼糜出现过烧糊化现象，并在固化过程中伴有少量浓烟，随着扫描速率的升高，糊化现象有所改善，当扫描速率为500 mm/s时，扫描线条上的鱼糜无明显烧灼痕迹，固化宽度和厚度趋于稳定，如图3所示。

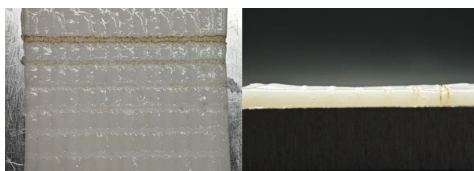


图3 单线条扫描实验结果^[49]

Fig. 3 Results of single line scanning experiments^[49]

综上，激光参数对食品3D打印成型至关重要，应用于食品3D打印时，将激光类型、激光波长、激光功率、激光脉冲和扫描速率等加工因素进行相互、精细微调，才能有效发挥激光加工的优势，确保获得期望的打印效果^[50]。

2.2 激光在食品3D打印中的工艺优势

激光具有高效性（红外激光具有优异的热效应）、精准性（激光束可以精确控制热源的位置和强度）的加热特点，且红外激光波长较长，光子能量较低，难以破坏常见的化学键，在食品蒸煮、干燥、打孔、去皮等方面发挥重要作用，正在成为食品3D打印领域一种极具潜力的加工工艺。Gràcia Julià^[51]开发了一种适用于食品3D打印机的新型熟化系统（ CO_2 红外激光烹饪系统），该系统由 CO_2 激光灯、将激光束导向熟化区域的振镜及可控制振镜位置和运动频率的软件组成，可以均匀地熟化选定区域。微生物学和毒理学分析结果显示， CO_2 红外激光烹饪系统中熟化的牛肉汉堡，由豆类、蔬菜和鸡蛋为主要原料制作的素食馅饼及披萨面团与传统烹饪系统（平面烤架、烧烤架、红外烤箱、台式烤箱和微波炉等）中熟化的食品一样安全，消费者对 CO_2 红外激光熟化的食品具有与传统熟化方式相同甚至更高的偏好度。此外，SLS是激光技术应用于食品3D打印的一种重要加工手段，能够制造更为复杂的食品，提升生产效率且无需后处理。如Noort等^[52]发明了一种适合于SLS打印的可食用粉末组合和可食用液体，可用于打印意大利面、烘焙产品和糖果产品等，进一步证实激光技术与食品3D打印结合可实现更加精准和复杂的食品结构制作或调控。以上研究表明，激光技术在食品3D打印中的工艺优势不仅体现在提高精度和灵活性上，还表现在提高效率和降低成本上，未来，激光技术与食品3D打印技术的融合将为个性化定制食品和创新性食品设计提供更多可能性。

3 激光技术在食品3D打印中面临的挑战

3.1 激光照射下的食品安全问题

激光作为一种高效、非接触式技术,在过去30年里已被证明可以有效灭活多种微生物,如霉菌、细菌、酵母菌,甚至病毒,其对食品的去污效果也得到了充分证明^[53-57]。如Kohmura等^[58]在可见光(532 nm)脉冲激光照射下,通过将能吸收可见光的材料与大肠杆菌融合实现了对大肠杆菌的高效灭活;Yasmin等^[59]采用激光灭活食品包装和生牛奶中的食源性病原体,结果发现,大肠杆菌、沙门氏菌、酵母菌和乳酸菌在生牛奶中分别减少30%、25%、47%和30%,并且激光照射对牛奶的理化性质没有显著影响,该研究进一步证实了激光技术在确保食品安全方面的潜力。

此外,在考虑食品安全性的同时,也要考虑激光对食品营养成分的影响。激光是一种能量形式,其对营养成分的影响主要取决于激光参数(如波长、功率和脉冲等)。食品所含营养物质中,脂肪、部分维生素等较为敏感,加热易被破坏。Chen Shinyu等^[60]发现,短脉冲距离(2.5 cm)和长脉冲时间(120个脉冲)处理可导致蘑菇粉VD₂含量降低和变色;在另一项研究中,Tomasevic等^[61]发现,经过1.75 J/cm²激光处理后,在新鲜鸡蛋面条中检测到硫黄异味。因此,激光技术应用于食品3D打印时,应选择合理的激光参数和加工方式,最大限度发挥激光技术的优势,同时确保食品的安全性、感官品质和营养价值。

3.2 激光技术在食品工业中的应用局限

激光技术在食品加工领域的应用仍存在一些局限。首先,激光设备成本较高,包括激光器、光路系统和控制系统等,以及后期设备的维护费用,这对于一些中小型企业来说可能存在一定的经济负担。其次,激光加工也存在一定局限性。激光技术在过去的几十年发展中,虽然已经广泛应用于食品表面处理、检测和包装等方面,但对于食品深度加工仍受到多种因素影响,如操作人员技术水平、激光参数和打印材料特性等。此外,还需考虑能源消耗和环境影响,因为激光会消耗大量能源,这可能导致更高的运营成本和更多的碳排放,探究节能激光技术是解决该问题的一项有效措施。为克服激光技术在食品加工领域中的应用局限,还需持续研发与创新,进一步提高加工效率、成本效益,并充分关注激光加工食品的安全性问题。

4 结 语

随着科技的不断进步,激光技术在食品工业中展现出巨大的应用潜力,其优势在食品加工、包装和无损检

测等各种应用中显而易见,为食品工业带来了新的发展机遇,特别是在食品3D打印领域,激光技术的应用前景广阔。尽管面临诸多挑战,但随着材料科学、激光工艺和打印控制等技术的不断进步,激光食品3D打印必将迎来新的发展机遇。

首先,激光技术在食品3D打印中的应用目前还处于初级阶段,仍存在食品材料选择和适应性方面的问题。目前可用于激光食品3D打印的食品材料种类有限,需进一步研发具有良好成型性和食品安全性的新型材料,以满足不同人群的个性化食品定制需求。其次,食品3D打印中的路径算法和激光参数控制也是一个挑战,不同食材对激光的反应和加工效果各异,需针对不同食材进行路径算法和激光参数的调整和优化。最后,激光食品3D打印设备的成本还需进一步降低。一方面,通过技术创新研发低功率、低成本的激光器件;另一方面,政府也应出台相关扶持政策,鼓励企业投入研发,促进这一技术的应用,提高公众对这一新兴技术的认知和接受度。未来,激光技术在食品3D打印中的应用会越来越广泛,为人类提供更加健康、美味、个性化的食品,助力食品制造业向智能、个性化和可持续发展的方向发展。

参考文献:

- [1] MACDONALD E, WICKER R. Multiprocess 3D printing for increasing component functionality[J]. *Science*, 2016, 353: aaf2093. DOI:10.1126/science.aaf2093.
- [2] ADAMS M. The 'third industrial revolution': 3D printing technology and Australian designs law[J]. *Journal of Law, Information and Science*, 2015, 24(1): 56-84. DOI:10.3316/informit.506945693247444.
- [3] BHAT Z F, MORTON J D, KUMAR S, et al. 3D printing: development of animal products and special foods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 87-105. DOI:10.1016/j.tifs.2021.09.020.
- [4] DANKAR I, HADDARAH A, OMAR F E L, et al. 3D printing technology: the new era for food customization and elaboration[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 75: 231-242. DOI:10.1016/j.tifs.2018.03.018.
- [5] CUI L J, GUO J X, MENG Z. A review on food-grade-polymer-based O/W emulsion gels: stabilization mechanism and 3D printing application[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 139: 108588. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.108588.
- [6] PORTANGUEN S, TOURNAYRE P, SICARD J, et al. Toward the design of functional foods and biobased products by 3D printing: a review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 86: 188-198. DOI:10.1016/j.tifs.2019.02.023.
- [7] LEE J. A 3D food printing process for the new normal era: a review[J]. *Processes*, 2021, 9(9): 1495. DOI:10.3390/pr9091495.
- [8] HE C, ZHANG M, FANG Z X. 3D printing of food: pretreatment and post-treatment of materials[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(14): 2379-2392. DOI:10.1080/10408398.2019.1641065.
- [9] PANCHEV I N, KIRTCHEV N A, DIMITROV D D. Possibilities for application of laser ablation in food technologies[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2011, 12(3): 369-374. DOI:10.1016/j.ifset.2011.02.008.

- [10] HUANG Y, LEU M C, MAZUMDER J, et al. Additive manufacturing: current state, future potential, gaps and needs, and recommendations[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2015, 137(1): 014001. DOI:10.1115/1.4028725.
- [11] GU D D, MEINERS W, WISSENBAACH K, et al. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms[J]. International Materials Reviews, 2012, 57(3): 133-164. DOI:10.1179/1743280411y.0000000014.
- [12] CHO Y H, LEEI H, CHO D W. Laser scanning path generation considering photopolymer solidification in micro-stereolithography[J]. Microsystem Technologies, 2005, 11(2): 158. DOI:10.1007/s00542-004-0468-2.
- [13] CHENG Y, FU Y, MA L, et al. Rheology of edible food inks from 2D/3D/4D printing, and its role in future 5D/6D printing[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107855. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.107855.
- [14] MANTHAL S, PRAKASH S, GODOI F C, et al. Optimization of chocolate 3D printing by correlating thermal and flow properties with 3D structure modeling[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 44: 21-29. DOI:10.1016/j.ifset.2017.09.012.
- [15] 杨耿涵, 黄明远, 徐幸莲. 食品3D打印技术及其在肉类加工中应用的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(21): 308-314. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201012-084.
- [16] SLUSHER R E. Laser technology[J]. Reviews of Modern Physics, 1999, 71(2): S471. DOI:10.1103/RevModPhys.71.S471.
- [17] MAIMAN T H, MAIMAN T H, HOLLAND. Laser inventor[M]. Los Angeles: Springer International Publishing AG, 2018. DOI:10.1007/978-3-319-61940-8.
- [18] GILLNER A, HOLTkamp J, HARTMANN C, et al. Laser applications in microtechnology[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 167(2/3): 494-498. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2005.05.049.
- [19] PANCHEV I N, KIRTCHEV N A, DIMITROV D D. Possibilities for application of laser ablation in food technologies[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2011, 12(3): 369-374. DOI:10.1016/j.ifset.2011.02.008.
- [20] MORISASA M, SATO T, KIMURA K, et al. Application of matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry imaging for food analysis[J]. Foods, 2019, 8(12): 633. DOI:10.3390/foods8120633.
- [21] LI T, LIN H, ZHANG H, et al. Application of tunable diode laser spectroscopy for the assessment of food quality[J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(5): 929-938. DOI:10.1177/0003702816667515.
- [22] CHANDRASEKARAN M, MARCROFT H, BAKALIS S, et al. Applications of laser Doppler anemometry in understanding food processing operations[J]. Trends in Food Science & Technology, 1997, 8(11): 369-375. DOI:10.1016/S0924-2244(97)01084-4.
- [23] BAI Z, ZHAO Z, TIAN M, et al. A comprehensive review on the development and applications of narrow-linewidth lasers[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2022, 64(12): 2244-2255. DOI:10.1002/mop.33046.
- [24] NACHAL N, MOSES J A, KARTHIK P, et al. Applications of 3D printing in food processing[J]. Food Engineering Reviews, 2019, 11(3): 123-141. DOI:10.1007/s12393-019-09199-8.
- [25] 姚旭盛. 糖基粉末激光烧结成形工艺研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2015: 1-10.
- [26] 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. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201110-097.
- [27] 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. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2016.01.025.
- [28] SENNI L, BURRASCANO P, RICCI M. Multispectral laser imaging for advanced food analysis[J]. Infrared Physics & Technology, 2016, 77: 179-192. DOI:10.1016/j.infrared.2016.06.001.
- [29] PANDISELVAM R, MAYOOKHA V P, KOTHAKOTA A, et al. Biospeckle laser technique: a novel non-destructive approach for food quality and safety detection[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 1-13. DOI:10.1016/j.tifs.2019.12.028.
- [30] MANTHAL S, KOBUN R, LEE B B. 3D food printing of as the new way of preparing food: a review[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2020, 22: 100260. DOI:10.1016/j.ijgfs.2020.100260.
- [31] GODOI F C, BHANDARI B R, PRAKASH S, et al. An introduction to the principles of 3D food printing[M]//GODOI F C, BHANDARI B, PRAKASH S, et al. Fundamentals of 3D food printing and applications. Salt Lake City: Academic Press, 2019: 1-18. DOI:10.1016/B978-0-12-814564-7.00001-8.N.
- [32] CHYAN Y, YE R, LI Y, et al. Laser-induced graphene by multiple lasing: toward electronics on cloth, paper, and food[J]. ACS Nano, 2018, 12(3): 2176-2183. DOI:10.1021/acsnano.7b08539.
- [33] ZHANG D, YOU H, YUAN L, et al. Hydrophobic slippery surface-based surface-enhanced Raman spectroscopy platform for ultrasensitive detection in food safety applications[J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(7): 4687-4695. DOI:10.1021/acs.analchem.9b00085.
- [34] ANSARI-SHAHREZAEI S, BINDER S, STUR M. The effect of laser unit on photodynamic therapy spot size[J]. Graefes's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology, 2011, 249: 11-14. DOI:10.1007/s00417-010-1460-4.
- [35] SHEEN S, BAO G, COOKE P. Food surface texture measurement using reflective confocal laser scanning microscopy[J]. Journal of Food Science, 2008, 73(5): E227-E234. DOI:10.1111/j.1750-3841.2008.00787.x.
- [36] WANG D, ALI M, COBAU J, et al. Designs of a customized active 3D scanning system for food processing applications[C]//2021 ASABE Annual International Virtual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2021: 1. DOI:10.13031/aim.202100388.
- [37] RANASINGHESAGARA J, HSIEH F H, HUFF H, et al. Laser scanning system for real-time mapping of fiber formations in meat analogues[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(2): E39-E45. DOI:10.5772/55653.
- [38] WACKERBARTH H, STOLL T, GEBKEN S, et al. Carotenoid-protein interaction as an approach for the formulation of functional food emulsions[J]. Food Research International, 2009, 42(9): 1254-1258. DOI:10.1016/j.foodres.2009.04.002.
- [39] AISO K, WATANABE Y, SHIBLEE N I, et al. Food 3D printing with starch suspension[C]//Electrochemical Society Meeting Abstracts 240. The Electrochemical Society, Inc., 2021: 1594. DOI:10.1149/MA2021-02551594mtgabs.
- [40] BLUTINGER J D, MEIJERS Y, CHEN P Y, et al. Characterization of dough baked via blue laser[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 232: 56-64. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2018.03.022.
- [41] 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. DOI:10.1038/s41538-021-00107-1.
- [42] CHAO K, DHAKAL S, QIN J, et al. Depth of penetration of a 785 nm wavelength laser in food powders[C]//Sensing for Agriculture and Food Quality and Safety VII. SPIE, 2015, 9488: 111-119. DOI:10.1117/12.2177000.

- [43] GONCA S, POLAT B, OZAY Y, et al. Investigation of diode laser effect on the inactivation of selected Gram-negative bacteria, Gram-positive bacteria and yeast and its disinfection on wastewater and natural milk[J]. Environmental Technology, 2023, 44(9): 1238-1250. DOI:10.1080/09593330.2021.2000036.
- [44] FINE F, GERVAIS P. Efficiency of pulsed UV light for microbial decontamination of food powders[J]. Journal of Food Protection, 2004, 67: 787-792. DOI:10.4315/0362-028X-67.4.787.
- [45] GÓMEZ-LÓPEZ V M, DEVLIEGHERE F, BONDUELLE V, et al. Intense light pulses decontamination of minimally processed vegetables and their shelf-life[J]. International Journal of Food Microbiology, 2005, 103(1): 79-89. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2004.11.028.
- [46] WAMBURA P, VERGHESE M. Effect of pulsed ultraviolet light on quality of sliced ham[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(10): 2173-2179. DOI:10.1016/j.lwt.2011.05.016.
- [47] DIAZ J V, VAN BOMMEL K J C, NOORT M W J, et al. Method for the production of edible objects using SLS and food products: U.S., NL2014/050335[P]. 2018-10-09.
- [48] 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. DOI:10.1016/j.tifs.2017.08.018.
- [49] TONG Q, JIANG Y, XIAO S, et al. Research on improving the structural stability of surimi 3D printing through laser cooking techniques[J]. Journal of Food Engineering, 2024, 375: 112075. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2024.112075.
- [50] AMORIM F L F, LOHRENGEL A, NEUBERT V, et al. Selective laser sintering of Mo-CuNi composite to be used as EDM electrode[J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20(1): 59-68. DOI:10.1108/RPJ-04-2012-0035.
- [51] GRÀCIA JULIÀ A. Laser cooking system applied to a 3D food printing device[D]. Barcelona: Universitat Autònoma de Barcelona, 2019.
- [52] NOORT M W J, DIAZ J, VAN BOMMEL K J C, et al. Method for the production of an edible object using SLS: Netherlands, WO2016085344[P]. 2016-06-02.
- [53] OMS-OLIU G, MARTÍN-BELLOSO O, SOLIVA-FORTUNY R. Pulsed light treatments for food preservation. A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2010, 3: 13-23. DOI:10.1007/s11947-008-0147-x.
- [54] BHAVYA M L, UMESH HEBBAR H. Pulsed light processing of foods for microbial safety[J]. Food Quality and Safety, 2017, 1(3): 187-202. DOI:10.1093/qsafe/fyx017.
- [55] ROWAN N J, MACGREGOR S J, ANDERSON J G, et al. Pulsed-light inactivation of food-related microorganisms[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(3): 1312-1315. DOI:10.1128/AEM.65.3.1312-1315.1999.
- [56] ANDERSON J G, ROWAN N J, MACGREGOR S J, et al. Inactivation of food-borne enteropathogenic bacteria and spoilage fungi using pulsed-light[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28: 83-88. DOI:10.1109/27.842870.
- [57] ROBERTS P, HOPE A. Virus inactivation by high intensity broad spectrum pulsed light[J]. Journal of Virological Methods, 2003, 110: 61-65. DOI:10.1016/S0166-0934(03)00098-3.
- [58] KOHMURA Y, IGAMI N, TATSUNO I, et al. Transient photothermal inactivation of *Escherichia coli* stained with visible dyes by using a nanosecond pulsed laser[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 17805. DOI:10.1038/s41598-020-74714-5.
- [59] YASMIN N, HAMEED S, JAVED R, et al. Inactivation of foodborne pathogens on food packaging and in cow milk by exposure to a Nd:YAG laser[J]. Canadian Journal of Physics, 2017, 95(7): 662-669. DOI:10.1139/cjp-2016-0676.
- [60] CHEN S Y, HUANG S J, CHENG M C, et al. Enhancement of vitamin D₂ content in *Pleurotus* mushrooms using pulsed light[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2015, 39(6): 2027-2034. DOI:10.1111/jfpp.12443.
- [61] TOMASEVIC I, RAJKOVIC A. The sensory quality of meat, game, poultry, seafood and meat products as affected by intense light pulses: a systematic review[J]. Procedia Food Science, 2015, 5: 285-288. DOI:10.1016/j.profoo.2015.09.081.