

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.80568

基于马铃薯淀粉和马铃薯泥的食品 3D 打印技术研究与发展

夏国峰^{1,2} 欧升阳¹ 周忠元¹ 陶李路路¹ 林东琪¹

(1. 重庆三峡学院机械工程学院, 重庆 404100; 2. 智能制造先导技术重庆市高校工程研究中心, 重庆 404100)

摘要: 马铃薯作为主食材料, 富含多种营养物质, 对调节居民的膳食营养结构起重要作用。文章综述了基于马铃薯淀粉和马铃薯泥的食品 3D 打印技术研究, 包括马铃薯淀粉作为主材料和添加剂情况下的食品 3D 打印性能研究, 以及食品添加剂和打印温度对食品 3D 打印性能的影响研究; 基于马铃薯泥的食品 3D 打印技术研究, 包括预处理方式、添加剂、打印温度和填充结构对食品 3D 打印性能的影响研究; 并讨论了马铃薯食品 3D 打印技术面临的问题和发展前景及马铃薯在食品 4D 打印领域的研究发展方向。

关键词: 食品 3D 打印; 马铃薯淀粉; 马铃薯泥; 食品加工

Research and development of food 3D printing based on potato starch and potato puree

XIA Guofeng^{1,2} OU Shengyang¹ ZHOU Zhongyuan¹ TAO Lilulu¹ LIN Dongqi¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China; 2. Chongqing Engineering Research Center for Advanced Intelligent Manufacturing Technology, Chongqing 404100, China)

Abstract: As a staple food material, potatoes are rich in a variety of nutrients, which play an important role in regulating the dietary nutritional structure of residents. The article reviews the research on food 3D printing technology based on potato starch and potato puree, mainly including the research on food 3D printing technology based on potato starch. The study of food 3D printing performance under the condition of potato starch as the main material and additive, and the study of the influence of food additives and printing temperature on food 3D printing performance. Research on food 3D printing technology based on potato puree, including the effects of pretreatment methods, additives, printing temperature, and filling structure on the 3D printing performance of food. The problems and development prospects faced by potato food 3D printing technology were discussed, the research and development direction of potatoes in the field of food 4D printing.

Keywords: food 3D printing; potato starch; potato puree; food processing

马铃薯富含膳食纤维、维生素、微量元素等多种人体必需营养物质, 对调节居民的膳食营养结构起重要作用。近年来, 在马铃薯主食化战略背景下, 相关科研机构研发出多种马铃薯主食产品, 包括马铃薯馒头与面包、马铃薯面条、马铃薯米粉、马铃薯饼干等^[1]。杨钠^[2]以硬度、咀嚼性和弹性作为响应值, 优化了马铃薯全粉面条的配方。张笑笑等^[3]利用响应面法优化了马铃薯泥面条工艺配方, 并分析了面条中马铃薯泥、盐和水含量对感官得分和断条率的影响。

孙莹等^[4]以马铃薯粉和中筋小麦粉为主要原料, 通过回归分析得到了马铃薯粉、酵母量、水、面包改良剂和绵白糖等添加剂的最优配比。随着生活质量的不断提高, 消费者追求更高的营养功能、味道口感和饮食体验, 仅从食物本身出发的思考和研究已很难满足社会多元化的需求^[5]。

3D 打印又称增材制造 (additive manufacturing), 是一种基于计算机设计软件构建的模型数据, 通过层层叠加沉积的方法快速制造三维实体的技术手段, 具有设计自

基金项目: 重庆市科学技术局自然科学基金 (编号: cstc2019jcyj-msxm1239); 智能制造先导技术重庆市高校工程研究中心开放基金项目 (编号: ZNZZXDJS202002)

通信作者: 夏国峰 (1985—), 男, 重庆三峡学院副教授, 博士。E-mail: xianguofeng@sanxiau.edu.cn

收稿日期: 2023-06-20 **改回日期:** 2024-05-11

由、可大规模定制、原料节省和快速成型等特点,已被应用于机械工程、航空航天工程、生物医学工程和食品加工等领域^[6]。严洁等^[7]使用挤压型打印机(Fab@home)将3D打印技术引入到食品加工领域,验证了食品3D打印可以节约食材、拓宽食材的范围、突破传统加工工艺的限制、满足特定人群与特殊场景的食品定制化需求。

目前,粉末烧结、挤出成型、黏合剂注射和喷墨打印4种类型的3D打印技术被应用于食品打印中,其中以挤出成型的应用最为成熟^[8]。基于挤出型3D打印技术研发的食品打印材料种类繁多,如魔芋胶—蓝莓凝胶^[9]、小麦淀粉^[10]、山药凝胶^[11]、蔗糖^[12]、牛肉糜^[13]等。马铃薯在食品3D打印领域的研究主要是基于挤出成型技术,分析了材料配比、添加剂、预处理、打印温度和打印方式等对打印性能的影响。文章拟综述基于马铃薯淀粉和马铃薯泥的

食品3D打印技术研究,以及马铃薯在食品4D打印领域的研究现状,并对马铃薯食品3D打印技术面临的问题和发展前景进行讨论和展望,以期马铃薯食品加工技术的发展提供参考。

1 基于马铃薯淀粉的食品3D打印技术

1.1 材料对比对打印性能的影响

马铃薯淀粉具有糊化温度低、易膨胀、吸湿能力和保湿能力强等其他淀粉所不具备的理化性质^[14-16],这些性质使马铃薯淀粉具有开发成食品3D打印材料的优势。有关食品3D打印技术研究中,马铃薯淀粉常被用作主材料或辅料来进行食品3D打印材料的研发。不同食品材料与马铃薯淀粉混合后,打印性能和打印样品品质发生显著变化,如表1所示。

表1 不同食材与马铃薯淀粉混合前后的打印性能和打印样品

Table 1 Printing performance and sample after mixing different ingredients with potato starch

主要材料	混合后材料性能变化	单独打印时的样品	混合后的打印样品	相关文献
马铃薯淀粉	材料的屈服应力(τ_0)、储能模量	黏度低,容易挤出,	添加2%马铃薯淀粉的马铃薯泥打印样品形状稳	[17]
(添加剂)、(G')、损耗模量(G'')增加, $\tan\delta$		样品变形,分辨率差	定,表面纹理光滑,分辨率好	
马铃薯泥	减小			
马铃薯淀粉	马铃薯淀粉添加量从10%增加		当马铃薯淀粉添加量为17.5%,20.0%时,材料的黏	[18]
(添加剂)、到20%(增量为2.5%), G' 、 G'' 均			度过大;当马铃薯淀粉添加量为0,12.5%时,材料的	
柠檬汁	增加, $\tan\delta$ 减小,机械强度增加		黏度过低,流动性差;当马铃薯淀粉添加量为15.0%	
			时,打印样品结构稳定光滑,接近目标形状	
马铃薯淀粉	马铃薯淀粉凝胶的 G' 、 G'' 增加,	打印长度和高度的	尺寸精度在0,10%,20%,30%的添加量下先升高	[19]
(主材料)、 $\tan\delta$ 减小,机械强度增加		精度较低	后降低,添加量为20%时达最大	
蓝莓果粉				
马铃薯淀粉	硬度增加,内聚力先增加后减	样品形状部分缺	当豌豆蛋白添加量为1%时,样品的形状完整,分辨率	[20]
(主材料)、小,当添加量为1%时达到最大		失,分辨率较低	高;当豌豆蛋白添加量>2%时,样品打印效果变差;当	
豌豆蛋白	值,表面黏附力总体水平降低		豌豆蛋白添加量为8%时,样品不能被顺利挤出	

马铃薯淀粉糊化后的黏弹性随马铃薯淀粉含量的增加而增加,向食品材料中加入马铃薯淀粉可以提高其打印性能。Liu等^[17]发现向马铃薯泥(MP)中加入马铃薯淀粉(PS)后,马铃薯泥的打印性能和打印样品品质优于未添加PS的马铃薯泥,添加2%PS的马铃薯泥打印样品品质最好。Yang等^[18]研究发现,随着马铃薯淀粉(PS)添加量的增加,柠檬汁凝胶的黏度、储能模量(G')、损耗模量(G'')均增加,动态机械损失切线值($\tan\delta=G''/G'$)减小,说明加入PS的柠檬汁凝胶表现出以弹性为主的固体特征^[19],拥有更高的机械强度和更强的自支撑能力,与Liu等^[17]的研究结论一致。当PS添加量为15%时,打印样品结构稳定光滑,接近目标形状。

某些食品材料可以影响糊化马铃薯淀粉的微观结构,进而影响其打印性能。范东翠等^[20]研究发现,在不同的蓝莓果粉添加量下,蓝莓果粉—马铃薯淀粉混合材料的表观黏度、储能模量、损耗模量均得到一定程度的提升,且随着蓝莓果粉添加量的增加,混合材料凝胶化形成

的结构越致密,材料的机械性能越强。当蓝莓果粉添加量为20%时打印样品精度最高,品质最好。Feng等^[21]发现原生马铃薯淀粉(NPS)的大部分颗粒为椭球体,表面光滑,大小不一(图1),少数颗粒因淀粉干燥而出现凸起和凹陷,与Zhu等^[22]的结论一致。向NPS中加入豌豆蛋白后,淀粉粒之间的交联度发生显著变化,随着豌豆蛋白添加量从0增加到8%,淀粉粒之间的交联度先升高后降低,当豌豆蛋白添加量为1%时达到最高。添加豌豆蛋白后材料的交联程度均明显高于NPS,是因为豌豆蛋白的加入产生了连续的蛋白质基质基团和淀粉颗粒均匀分布的网络结构,促进了淀粉颗粒之间的交联^[23]。当豌豆蛋白添加量为0~1%时,3DPM的交联度和内聚性逐渐增强,当豌豆蛋白添加量从2%增加到8%时,3DPM的交联度和内聚性显著减小,与微观结构的变化相对应。随着豌豆蛋白添加量的增加,硬度持续增大;当豌豆蛋白添加量为1%时打印样品品质最好;当豌豆蛋白添加量为2%~8%时,打印样品的形状和分辨率较差。

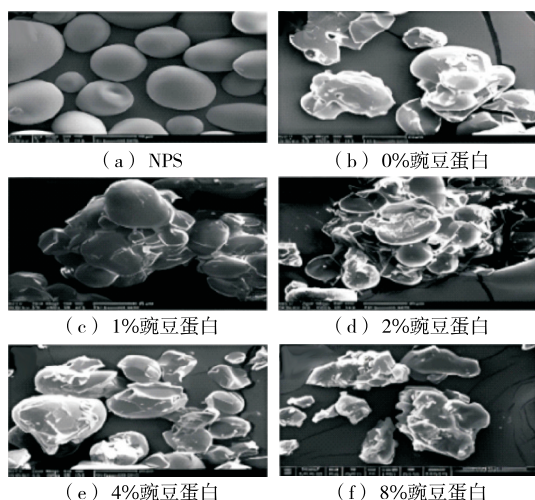
图1 NPS和3DPM的SEM显微照片^[20]

Figure 1 SEM photomicrographs of NPS and 3DPM

1.2 食品添加剂对打印性能的影响

Liu等^[24]研究了黄原胶(XG)、瓜尔胶(GG)、k-卡拉胶(KG)和k-卡拉胶—黄原胶(KG-XG)等食品添加剂对材料打印性能的影响。结果显示,除XG外,其他添加剂均增加了MP的黏度、储能模量(G')和损耗模量(G'')。在MP中添加KG,显著提高了材料的凝胶强度,可能是因为KG与直链淀粉和支链淀粉分子相互作用的结果。KG-MP样品具有良好的自支撑性能,样品表面粗糙;XG-MP打印的样品比模型尺寸稍大,表面结构光滑;自支撑性能呈现出KG-MP>KG-XG-MP>GG-MP>XG-MP的递减顺序。董茗洋等^[25]以马铃薯淀粉和大豆分离蛋白的糖基化产物为原料,研究了明胶、结冷胶和可得然胶等食品添加剂对材料打印性能的影响。结果显示,添加剂并未与马铃薯淀粉发生化学反应,但对微观结构影响显著,如加入添加剂后,混合材料在不同程度上失去了马铃薯淀粉原有的颗粒结构,凝胶表面变得粗糙,甚至加入可得然胶后,材料的颗粒表面有裂痕产生,这可能与淀粉—亲水胶体混合体系的“损耗絮凝”有关。4种胶体均呈现剪切稀化行为,与Wang等^[26]关于胶体流变特性的研究结果一致。加入添加剂后,混合材料的 G' 均大于 G'' ,动态机械损失切线值($\tan\delta$)均 >1 ,表明混合材料具有较好的固相性能,处于弹性优势状态。3种添加剂均有效改善了混合材料的打印性能:明胶增强了混合材料的胶凝性和机械强度;结冷胶使样品表面呈现较好的凝胶色泽,内部形成了稳定的网络结构,提升了混合材料的打印稳定性;可得然胶提升了马铃薯淀粉的硬度,使打印样品的形状更加稳定。

1.3 温度对打印性能的影响

温度是影响材料打印性能的重要因素。Liu等^[27]研究了马铃薯淀粉(PS)含量和打印温度对马铃薯淀粉凝胶打印性能的影响。结果显示,马铃薯淀粉凝胶中PS含量越高,特定空间内淀粉链的数量越多,淀粉链的纠缠越明

显,网络结构越致密,PS凝胶机械强度越大。而打印温度通过影响PS的糊化和淀粉链的释放来影响PS的结构转变,温度过低时PS凝胶的流变性能较差,温度过高时PS凝胶的强度降低。70℃下,当PS添加量为15%~25%时,打印的样品品质最好,且材料的流变特性处于合适的范围内。食品3D打印技术的研究多以室温为打印温度来进行食品材料打印性能的研究,通常被当作在最佳材料配比基础上,进一步提升打印性能的打印参数来研究。

2 基于马铃薯泥的食品3D打印技术

2.1 预处理方法、添加剂和打印温度对打印性能的影响

马铃薯淀粉的微观结构直接影响马铃薯泥的流变性与机械强度。研究发现,经微波加热(MP)和煮沸(BP)处理的马铃薯泥,其淀粉细胞形态差异显著^[28];BP处理的马铃薯泥淀粉细胞比生马铃薯泥淀粉细胞(图2)的大^[29]。在BP样品中观察到更多分离的淀粉颗粒和较浅的颜色,可能是煮沸过程中,可溶性直链淀粉从细胞中滤出,导致马铃薯组织的胞间层和细胞壁中的果胶物质被破坏,而果胶含量减少导致大量水分渗透到细胞之间,淀粉细胞单位面积上的相对浓度降低,单个细胞体积变大^[30]。与BP处理的马铃薯泥相比,微波处理过程中高能量的输入使土豆中水分蒸发,导致马铃薯泥的水分含量相对较低,促进形成机械强度更高的凝胶。向两种状态马铃薯泥中分别加入琼脂、海藻酸盐、黄油、橄榄油和胡萝卜等添加剂后,MP样品比BP样品具有更高的触变性 with 屈服应力(表2)。打印结果显示,BP样品能被光滑地挤出,但机械强度较低,无法保持形状的稳定,添加琼脂后,其打印效果有所改善。MP样品总体打印效果更好,其中以MP马铃薯泥+1%的黄油(图3)试验组样品的打印品质最好。说明淀粉的含水量直接影响淀粉内部的微观结构,进而影响淀粉的机械性能和流变性能^[31]。

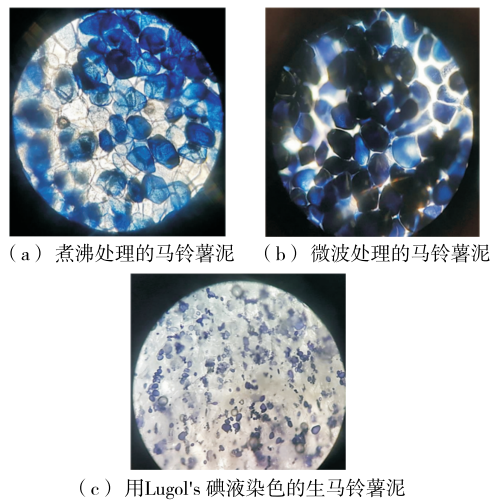
图2 马铃薯泥显微镜图像^[28]

Figure 2 Microscopic images of potato puree (10×)

表 2 添加不同添加剂后微波(MP)和煮沸(BP)处理的马铃薯泥的触变性和屈服应力^[28]

Table 2 Thixotropy and yield stress of potato puree treated by microwave (MP) and boiling (BP) with different additives

样品	触变性/(Pa·s ⁻¹)	屈服应力/Pa	样品	触变性/(Pa·s ⁻¹)	屈服应力/Pa
MP	2 231.00	280	BP	458.64	42
MP+1% 琼脂	8 713.00	1 250	BP+1% 琼脂	1 791.67	200
MP+1% 海藻酸	2 972.00	260	BP+1% 海藻酸	1 105.78	120
MP+1% 黄油	4 633.50	330	BP+1% 黄油	744.97	80
MP+1/3 胡萝卜	2 866.00	280	BP+1/3 胡萝卜	371.73	40
MP+1% 橄榄油	2 885.25	245	BP+1% 橄榄油	412.73	34

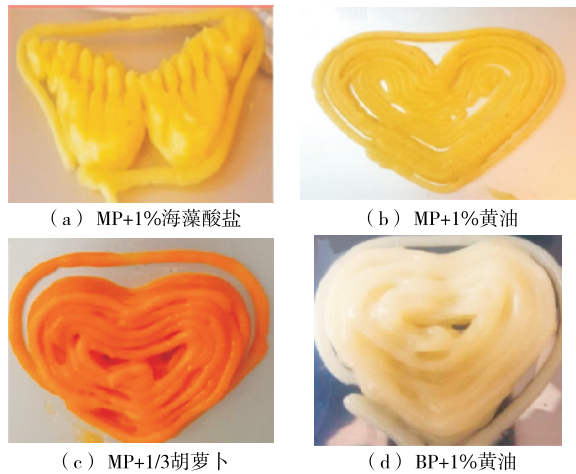


图 3 微波(MP)和沸水(BP)处理的马铃薯泥添加不同添加剂后的打印样品^[28]

Figure 3 Printed samples of potato puree treated with microwave (MP) and boiling water (BP) with different additives added

Dankar等^[32]研究发现,向马铃薯泥中加入琼脂、海藻酸盐和甘油后,马铃薯泥的微观结构发生显著变化。添

加海藻酸盐的马铃薯泥产生更多的褶皱,而添加琼脂和甘油的马铃薯泥产生了纤维状网络结构(图4),且随着琼脂添加量的增加,这些网络结构演变为更多折叠和弯曲的连续相,为马铃薯淀粉和琼脂之间相互作用的结果^[33]。添加海藻酸盐后,马铃薯泥形成褶皱的原因可能是海藻酸盐多糖复合物的形成。这些微观上的曲折一定程度上解释了添加琼脂和海藻酸盐后马铃薯泥内部强度和机械特性会增加的原因。添加琼脂的马铃薯泥,其结构凝聚性更强,而添加了海藻酸盐的马铃薯泥一致性值更高,且打印样品的分辨率比纯马铃薯泥的更高,结构也更稳定。综上,Danka等^[28, 32]从微观层面研究了预处理和添加剂对马铃薯泥打印性能的影响,对进一步发展食品 3D 打印具有重要的参考价值。

Martínez-Monzó等^[34]研究了打印温度和马铃薯全粉添加量对食品材料打印性能的影响。结果显示,所有样品均表现出剪切稀化的行为,且随着马铃薯全粉添加量的增加,材料的稠度系数增大,可能是由于材料中马铃薯全粉添加量增加导致单位体积淀粉分子的数量增加,分子间形成氢键的概率增大,而更多的氢键使网络结构更加紧密,与Liu等^[27]的研究结论一致。随着马铃薯全粉添

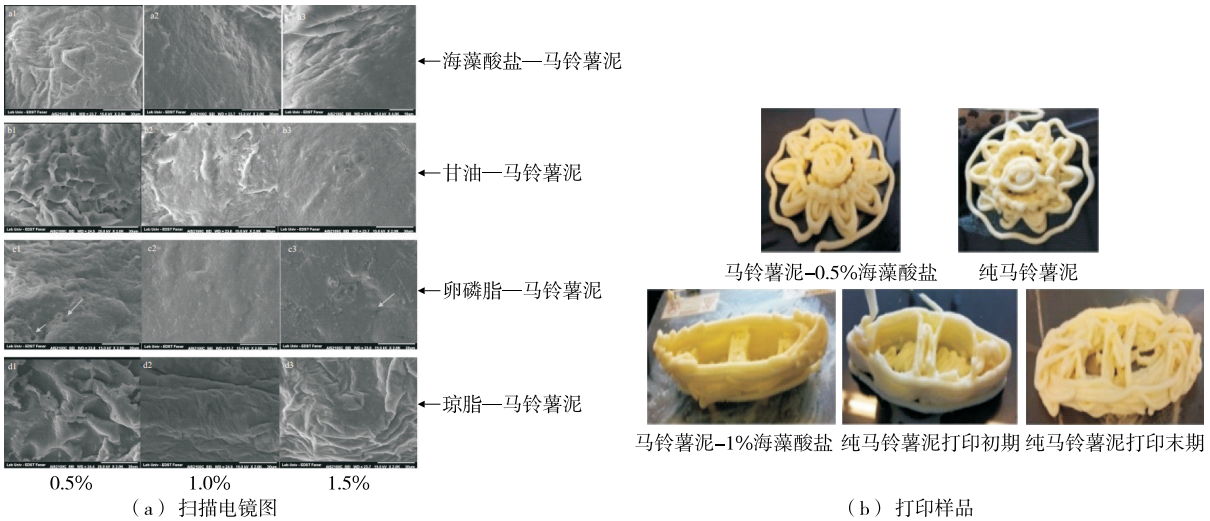


图 4 加入不同添加剂后马铃薯泥扫描电镜图及打印样品^[32]

Figure 4 Scanning electron microscopy images and printed samples of potato puree after adding different additives

加量的增加,储能模量(G')和损耗模量(G'')增大,可能是更多的淀粉颗粒吸水膨胀,最终形成了更密集的网络结构。Martínez-Monzó等^[34]以打印率来表示模型的打印完成度,数值为100%表示该模型完全打印,打印是否会中断取决于打印过程中打印层沉积后与底层是否完全对应。结果显示,最大打印率为50%,对应30℃打印温度和38g的马铃薯全粉,说明在最佳配方和温度下,只打印出最大高度约为40mm(模型高度为80mm)的不变形结构。当马铃薯全粉为28g时,最佳打印温度为10℃。综上,越大的模型尺寸,需要确定更精确的机械和流变性范围。

2.2 填充率和填充结构对打印样品性能的影响

填充率与填充结构在一定程度上影响了打印样品的性能和打印品质^[35-36]。Liu等^[37]向草莓汁中加入马铃薯淀粉,马铃薯泥中加入黄原胶(XG)和k-卡拉胶(KG)的混合物制成两种颜色不同的打印材料,利用双喷嘴挤出打

印系统,研究了填充率和填充结构对打印样品品质的影响。结果显示,打印样品的硬度和黏性随填充率的增加而增大,内部的填充结构使打印样品的形状变得更加美观,但对力学性能无显著影响。Liu等^[38]以马铃薯泥为原材料分析3D打印即食食品时,发现随着填充率的增加,打印样品的杨氏模量、硬度和黏性增大,但填充结构对这些力学性能无显著影响。打印结果显示,填充率过低会导致打印样品发生坍塌变形,填充率过高会导致打印样品分辨率降低(图5)。与传统模具压缩成型的样品相比,3D打印样品即使在100%填充水平下,杨氏模量、硬度和黏性也明显更低。从横纵截面对两种样品进行观察,发现传统模具压缩成型的样品内部具有均匀多孔结构的互联网络,而3D打印样品均观察到明显的分层结构,可能是因为3D打印样品层间的融合是由重力、内聚效应和马铃薯泥的模胀行为形成^[39],而铸造样品是在模具和更大的外力作用下压缩成形。

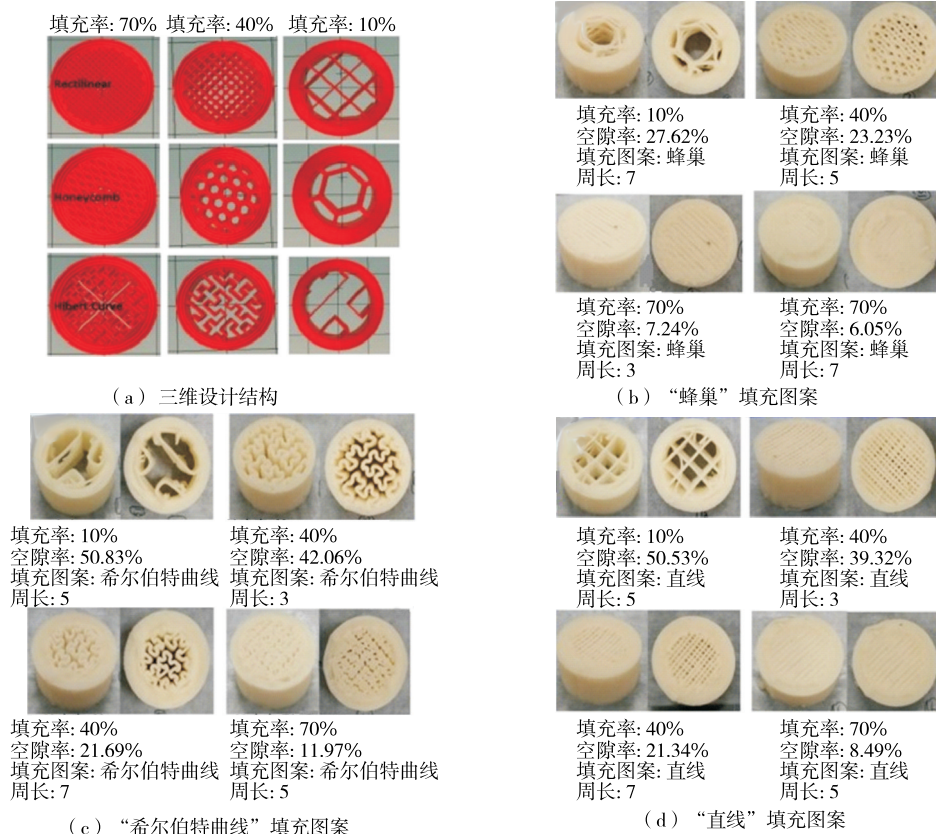


图5 不同填充结构的3D打印样品^[38]

Figure 5 3D printed samples with different filling structures

Liu等^[40]设计了打印样品的内部结构为直线型、立方形、蜂巢型,填充率为30%,50%,70%(图6)。结果显示,填充率直接影响打印食品的机械性能,填充率过低会导致打印样品结构的机械强度不够,无法维持结构的稳定,

如30%的填充率下,样品局部有坍塌。当填充率为50%时,打印样品品质最好;当填充率为70%时,部分结构被覆盖。打印样品硬度变化与填充水平和填充结构有关,如填充率从30%增加到50%,填充直线的样品硬度增量

高于填充立方形的样品。打印结果显示,打印样品厚度为6.36~7.16 mm,略大于目标几何尺寸(表3),可能是其黏弹性行为导致挤出线条膨胀,挤出线条的直径比喷嘴直径更大^[39]。后处理结果显示,空气油炸后马铃薯泥打印样品的含油量为13.47%,低于普通薯片39%的含油

量^[41],且不同填充率的打印样品,处理后的形状变化差异显著($P<0.05$),填充率高的样品形状变化更均匀(图6)。综上,填充结构可增加打印样品的美观性,填充率对打印样品的性能影响显著,且填充率大小需根据加工工艺和试验来确定。

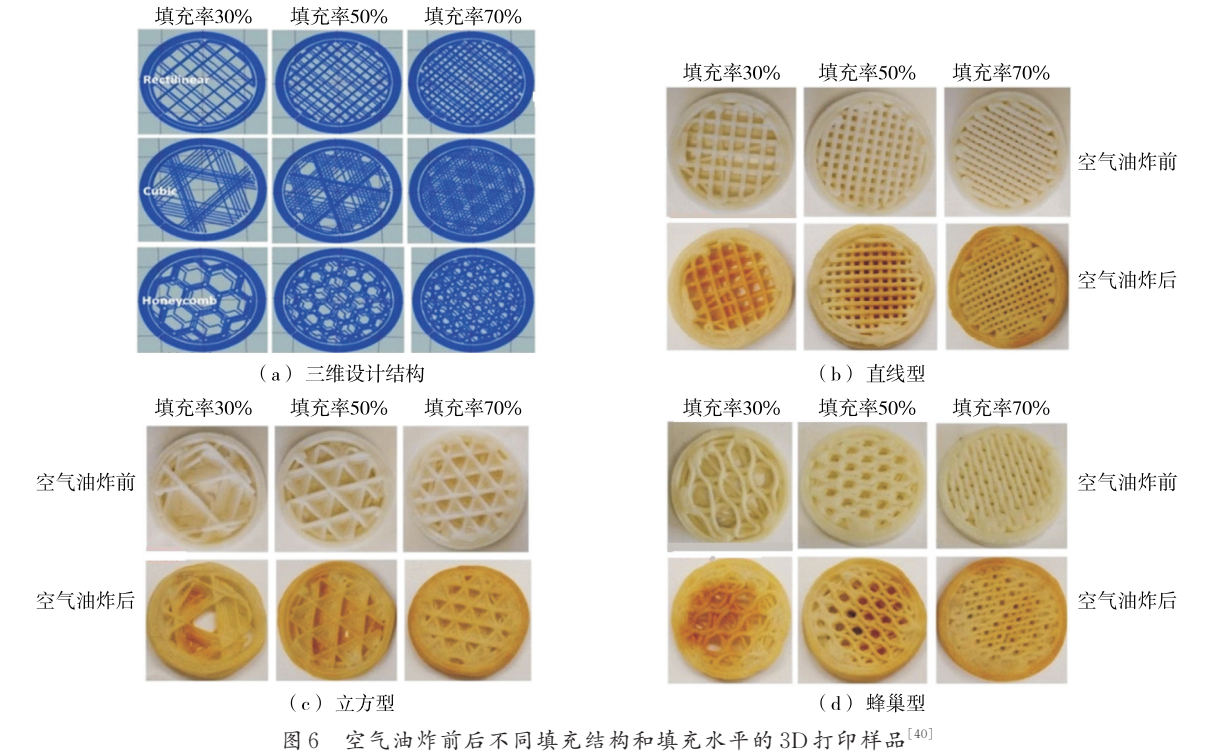


图6 空气油炸前后不同填充结构和填充水平的3D打印样品^[40]

表3 空气油炸前后3D打印样品的尺寸特性以及最终空气油炸饼干的水分含量^[40]
Table 3 Dimensional properties of 3D printed samples before and after air fried, and moisture content of final air fried cookies

样本	直径/mm		厚度/mm		含水量/%
	空气油炸前	空气油炸后	空气油炸前	空气油炸后	
直线-30%	39.77±0.11	35.33±0.20	6.36±0.06	5.79±0.39	3.83±0.19
直线-50%	39.86±0.32	36.18±0.39	6.81±0.12	5.59±0.26	3.80±0.09
直线-70%	39.99±0.35	36.27±0.82	6.96±0.15	5.50±0.49	4.01±0.23
立方-30%	39.41±0.36	36.85±0.96	6.78±0.43	5.51±0.37	3.79±0.22
立方-50%	39.69±0.28	36.01±1.07	7.15±0.13	5.31±0.24	3.91±0.19
立方-70%	39.70±0.32	37.86±0.41	7.16±0.11	5.51±0.25	3.95±0.12
蜂窝-30%	39.86±0.23	35.66±0.85	6.75±0.30	5.52±0.16	3.98±0.21
蜂窝-50%	39.83±0.32	36.70±0.47	6.51±0.16	5.46±0.23	3.99±0.11
蜂窝-70%	39.68±0.18	37.28±0.46	6.95±0.26	5.63±0.23	3.89±0.09

3 4D打印技术

4D打印是以3D打印为基础,打印的产品在受到特定条件刺激后,随着时间的推移表现出转化为目标形状或属性(如味道和颜色)的能力^[42-43]。基于马铃薯的4D食

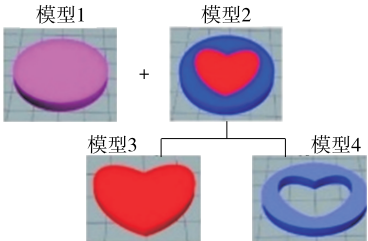
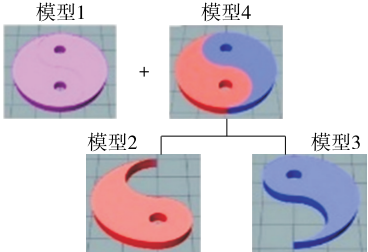
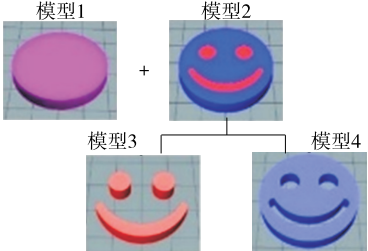
品打印技术研究主要以马铃薯泥为原材料,进行4D食品材料的研发。He等^[44]以马铃薯泥(MP)为原料,以微波脱水为触发条件,利用3D打印技术打印出随着时间的推移形状逐渐发生变化的食品。何畅^[45-46]使用紫薯泥(PSPP)、酸性马铃薯泥(CA-MP)和碱性马铃薯泥(SB-

MP)作为打印材料,利用紫薯中的花青素在酸碱环境中呈现不同颜色的性质,以3D打印技术为基础,MP中酸碱离子浓度差为触发条件,实现了PSPP中花青素向MP中

迁移,表现为随时间推移逐渐变色(表4)。食品4D打印技术研究处于初级阶段,马铃薯的现有3D打印研究将为4D打印提供更多数据和理论支持。

表4 多材料打印的复杂结构的自发变色^[46]

Table 4 Spontaneous color change of complex structures printed by multi-materials

打印模型设计	打印设计	打印图形	变色图片
	模型1(下层):PSPP 模型4(上层):CA-MP(模型2);SB-MP(模型3)		
	模型1(下层):PSPP 模型4(上层):SB-MP(模型2);CA-MP(模型3)		
	模型1(上层):SB-MP 模型4(下层):PSPP(模型2);SB-MP(模型3)		

4 结论与展望

流变性能和机械强度对样品的打印质量具有重要影响,基于马铃薯的打印材料既需要具有一定的流变性(能够顺利地打印挤出),又需要一定的机械强度来维持打印样品的形状。尽管马铃薯食品材料的打印性能与马铃薯淀粉含量、添加剂、温度和打印方式关系的研究日趋成熟,通过试验设计可以得到适合的打印性能,但目前马铃薯材料的食品3D打印仍面临一些局限性:①马铃薯打印食品后处理变形问题。现有的研究表明,多数打印的马铃薯食品均需要进行加热或者烹饪,而这样会导致打印形状收缩变形,失去原来的结构特征。因此,研究如何降低后处理对打印样品形状的影响是必要的。②打印更大尺寸的模型时,竖直方向上的重力会越来越大,底层需要具有更高的机械强度,但根据目前的研究来看,更高的机械强度将导致材料难以从喷嘴挤出,对打印底层进行后处理(加热或制冷)是提高打印底层机械强度的重要

途径。4D打印以3D打印为基础,随着可变化形状、颜色和口味的食品材料的研发,基于马铃薯淀粉和马铃薯泥的食品3D打印将会受到越来越多消费者的关注。

参考文献

[1] 王芳, 刘雁南, 赵文. 推进中国马铃薯主食化进程研究[J]. 世界农业, 2016(3): 11-14.
WANG F, LIU Y N, ZHAO W. Research on promoting the process of potato as a main food in China[J]. World Agriculture, 2016(3): 11-14.

[2] 杨钠. 马铃薯全粉面条加工和保鲜技术研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2015: 6-37.
YANG N. Research on processing and preservation technology of potato flour noodles[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2015: 6-37.

[3] 张笑笑, 李瑜. 响应面法优化马铃薯泥面条工艺配方[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(3): 20-24.
ZHANG X X, LI Y. Optimization of potatoes noodle process

- formula by response surface method[J]. *Packaging and Food Machinery*, 2016, 34(3): 20-24.
- [14] 孙莹, 江连洲, 王丽, 等. 基于回归分析的马铃薯全粉面包配方优选[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(2): 216-220.
- SUN Y, JIANG L Z, WANG L, et al. Study on optimization of potato flour bread formula based on regression analysis[J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2018, 34(2): 216-220.
- [5] 张梦超. 非油炸方便型马铃薯热干面的品质改良及其干燥特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 2-37.
- ZHANG M C. Study on the quality improvement and drying characteristics of non-fried instant potato hot dry noodles[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019: 2-37.
- [6] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172-196.
- [7] 严洁, GIANNI C, 陆一晨. 3D 打印技术助力食物设计[J]. *丝网印刷*, 2022(5): 44-46.
- YAN J, GIANNI C, LU Y C. 3D printing technology helps with food design[J]. *Screen Printing*, 2022(5): 44-46.
- [8] SUN J, PENG Z, ZHOU W, et al. A review on 3D printing for customized food fabrication[J]. *Procedia Manufacturing*, 2015, 1: 308-319.
- [9] 王浩, 谭畅, 陈静, 等. 魔芋胶对蓝莓凝胶体系 3D 打印特性的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 104-110.
- WANG H, TAN C, CHEN J, et al. Effect of konjac gum on 3D printing properties of blueberry gel system[J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 104-110.
- [10] 郑路瑶. 小麦淀粉 3D 打印特性的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2022: 11-52.
- ZHENG L Y. The characteristics of wheat starch gels molded by 3D printing[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2022: 11-52.
- [11] 冯蕾, 武敬楠, 李鸣, 等. 山药凝胶体系的 3D 打印特性[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(23): 1-7.
- FENG L, WU J N, LI M, et al. 3D printing characteristics of yam gel[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(23): 1-7.
- [12] 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: 40-62.
- YANG F R. Research on sucrose 3D printing process based on fused deposition modeling[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2019: 40-62.
- [13] 董琳琳, 田露, 肖凤, 等. 基于挤出成型的 3D 打印牛肉糜工艺研究[J]. *现代食品*, 2022, 28(1): 64-66.
- DONG L L, TIAN X, XIAO F, et al. Research on 3D printing beef mince technology based on extrusion[J]. *Modern Food*, 2022, 28(1): 64-66.
- [14] 吕振磊, 李国强, 陈海华. 马铃薯淀粉糊化及凝胶特性研究[J]. *食品与机械*, 2010, 26(3): 22-27.
- LU Z L, LI G Q, CHEN H H. Gelationization and gel properties of potato starch[J]. *Food & Machinery*, 2010, 26(3): 22-27.
- [15] CHEN J, DENG Z, WU P, et al. Effect of gluten on pasting properties of wheat starch[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2010, 9(12): 1 836-1 844.
- [16] 汪兰, 任斯忱, 杜欣, 等. 不同品种马铃薯淀粉物化特性与组成结构的关系[J]. *食品科学*, 2010, 31(21): 39-44.
- WANG L, REN S C, DU X, et al. Characterization and correlation analysis of physico-chemical properties of starch from different potato cultivars[J]. *Food Science*, 2010, 31(21): 39-44.
- [17] LIU Z, ZHANG M. Impact of rheological properties of mashed potatoes on 3D printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 76-82.
- [18] YANG F, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Investigation on lemon juice gel as food material for 3D printing and optimization of printing parameters[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87: 67-76.
- [19] NANDI S, GUHA P. Modelling the effect of guar gum on physical, optical, barrier and mechanical properties of potato starch based composite film[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 200: 498-507.
- [20] 范东翠, 陈慧芝, 郭超凡, 等. 蓝莓果粉—马铃薯淀粉凝胶体系的 3D 打印特性[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(5): 200-205.
- FAN D C, CHEN H Z, GUO C F, et al. 3D printing characteristics of blueberry fruit powder-potato starch composite system[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(5): 200-205.
- [21] FENG C, WANG Q, LI H, et al. Effects of pea protein on the properties of potato starch-based 3D printing materials[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2018, 14(3): 297.
- [22] ZHU J, LI L, CHEN L, et al. Study on supramolecular structural changes of ultrasonic treated potato starch granules[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 29(1): 116-122.
- [23] ZHANG D, MU T, SUN H. Calorimetric, rheological and structural properties of potato protein[J]. *Starch-Starke*, 2016, 69: 7-8.
- [24] LIU Z, ZHANG M, BHESH B. Effect of gums on the rheological, microstructural and extrusion printing characteristics of potato purees[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 117(1): 1 179-1 187.
- [25] 董茗洋, 陈革, 杨庆余. 不同胶体对马铃薯淀粉基材料 3D 打印特性的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(1): 44-52.

- DONG M Y, CHEN G, YANG Q Y. Effect of different colloids on 3D printing properties of potato starch-based materials[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(1): 44-52.
- [26] WANG L, ZHANG M, BHESH B, et al. Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing[J]. Journal of Food Engineering, 2018, 220: 101-108.
- [27] LIU Z, CHEN H, ZHENG B, et al. Understanding the structure and rheological properties of potato starch induced by hot-extrusion 3D printing[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105812.
- [28] DANKAR I, HADDARAH A, SEPULCRE F, et al. Assessing mechanical and rheological properties of potato puree: effect of different ingredient combinations and cooking methods on the feasibility of 3D printing[J]. Foods, 2020, 9(1): 21.
- [29] ORMEROD A, RALFS J, JOBLING S, et al. The influence of starch swelling on the material properties of cooked potatoes [J]. Journal of Materials Science, 2002, 37: 1 667-1 673.
- [30] ANDERSSON A, GEKAS V, LIND I, et al. Effect of preheating on potato texture[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1994, 34(3): 229-251.
- [31] SINGH N, KAUR L, EZEKIEL R, et al. Microstructural, cooking and textural characteristics of potato (*Solanum tuberosum* L) tubers in relation to physicochemical and functional properties of their flours[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(8): 1 275-1 284.
- [32] DANKAR I, PUJOLÀ M, EL OMAR F, et al. Impact of mechanical and microstructural properties of potato puree-food additive complexes on extrusion-based 3D printing[J]. Food and Bioprocess Technology, 2018, 11(11): 2 021-2 031.
- [33] PHAN T D, DEBEAUFORT F, LUU D, et al. Functional properties of edible agar-based and starch-based films for food quality preservation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(4): 973-981.
- [34] MARTÍNEZ-MONZÓ J, CÁRDENAS J, GARCÍA-SEGOVIA P. Effect of temperature on 3D printing of commercial potato puree[J]. Food Biophysics, 2019, 14(3): 225-234.
- [35] MANTHAL S, PRAKASH S, BHANDARI B. Textural modification of 3D printed dark chocolate by varying internal infill structure[J]. Food Research International, 2019, 121: 648-657.
- [36] HUANG M, 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.
- [37] LIU Z, ZHANG M, YANG C H. Dual extrusion 3D printing of mashed potatoes/strawberry juice gel[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96: 589-596.
- [38] LIU Z, BHANDARI B, PRAKASH S, et al. Creation of internal structure of potato puree construct by 3D printing and its textural properties[J]. Food Research International, 2018, 111: 534-543.
- [39] AL-MUSLIMAWI A, TAMADDON-JAHROMI H R, WEBSTER M F. Simulation of viscoelastic and viscoelastoplastic die-swell flows[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2013, 191: 45-56.
- [40] 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.
- [41] TRAN T T M. Reducing oil content of fried potato crisps considerably using a 'sweet' pre-treatment technique[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(2): 719-726.
- [42] KHOO Z X, TEOH J E M, LIU Y, et al. 3D printing of smart materials: a review on recent progresses in 4D printing[J]. 2015, 10(3): 103-122.
- [43] ZHANG Z, DEMIR K G, GU G X. Developments in 4D-printing: a review on current smart materials, technologies, and applications[J]. International Journal of Smart and Nano Materials, 2019, 10(3): 205-224.
- [44] HE C, ZHANG M, DEVAHASTIN S. Microwave-induced deformation behaviors of 4D printed starch-based food products as affected by edible salt and butter content[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2021, 70: 102699.
- [45] 何畅. 基于自发变形和变色的薯泥体系4D打印研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 42-56.
- HE C. Study on 4D printing of potato purees system based on spontaneous deformation and color change[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 42-56.
- [46] GHAZAL A F, ZHANG M, LIU Z. Spontaneous color change of 3D printed healthy food product over time after printing as a novel application for 4D food printing[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(10): 1 627-1 645.