

原料特性及打印参数对食品 3D 打印制品品质的影响

Effects of raw material characteristics and printing parameters on product quality in food 3D printing

张鹏辉 周浩宇 聂远洋 李 波

ZHANG Peng-hui ZHOU Hao-yu NIE Yuan-yang LI Bo

(河南科技学院食品学院, 河南 新乡 453003)

(School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China)

摘要:综述了淀粉类、亲水胶体类、肉类等食材的 3D 打印特性,分析了打印温度、打印速度、内部填充率、打印喷头直径等打印参数对 3D 打印制品品质的影响。

关键词:食品 3D 打印;食材;打印参数;打印特性;熔融沉积成型

Abstract: In this paper, the 3D printing characteristics of starch, hydrophilic colloid, meat and other food materials were reviewed. The effects of printing parameters such as printing temperature, printing speed, internal filling rate and printing nozzle diameter on 3D product quality were analyzed, so as to provide useful reference for the research of food 3D printing technology and the development of printing food materials.

Keywords: food 3D printing; food material; print parameter; print characteristics; fused deposition modeling

3D 打印技术(Three Dimension Printing, 3DP),又被称为增材制造^[1],诞生于 20 世纪 80 年代,其原理是通过一层层地打印可粘合材料,最终构成一个完整的物体^[2]。按照成型方式,3D 打印技术大致可分为熔融沉积成型(FDM)^[3-4]、选择性激光烧结成型(SLS)^[5]、光固化立体成型(SLA)^[6]、3D 印刷(3DP)^[7]、分层实体制造(LOM)^[8]等。不同的成型方式适用于不同性质的原料,如熔融沉积成型适用于巧克力等高温时融化、低温时凝结成固体的原料,选择性烧结成型适用于具有较低相对熔点的糖和脂肪原料^[9]。

3D 打印技术已被广泛应用于生物医药^[10]、航天^[11]、建筑^[12]、模具制造^[13]等领域,并因其具有灵活性高、可塑

性强、能实现个性化营养定制等特点,被应用于食品零售和食品营养领域^[14-18],如快速便捷地打印披萨、自助巧克力等产品,以及专为老年人及吞咽、咀嚼困难的病人研制的柔嫩易咀嚼的 3D 打印肉糜、营养面糊等^[19]。相对于传统食品加工技术,食品 3D 打印技术可根据个人的身体和营养状况^[20],制作一些无法通过手工或传统模具实现的复杂而奇妙的食品^[21],还能开发新型的食物资源,如 Secerini 等^[19]利用传统不食用的昆虫制备了富有营养的蛋白质—淀粉复合物;徐书洁^[22]使用不含胆固醇的植物蛋白制备的 3D 打印人造肉,可满足肥胖、高血脂等特殊人群的营养需求。

目前,食品行业中应用最广泛的 3D 打印技术是基于挤出成型的熔融沉积成型 3D 打印技术。挤出型 3D 打印技术对食品原料有严格的要求,一般需要满足一定的流变特性,既要能够顺利地挤压出来,又能保持一定的形状^[23];另一方面,打印速度、打印温度、填充率、打印喷头直径等打印参数对 3D 打印的效果也有较大影响。文章拟总结分析目前应用于熔融沉积成型 3D 打印技术中的食品原料特性,以及不同打印参数对打印效果的影响,以期食品 3D 打印技术的研究和打印食材的开发提供依据。

1 食品原料的 3D 打印特性

3D 打印材料应该是可食用的且具备良好的可塑性的材料,其可塑性主要取决于材料的可挤出性和形状稳定性,不同原料的可挤出性和形状稳定性存在显著差异。目前报道较多的食品 3D 打印材料有淀粉类^[14]、亲水胶体类和肉类等。

1.1 淀粉类材料

淀粉类材料如小麦粉^[24]、淀粉等来源广泛,可作为主食、装饰、调味品应用于 3D 打印中,还可以与其他食品组分混合^[25],并通过 3D 打印制得丰富多彩的产品^[26]。淀粉类食品打印材料及其影响因素见表 1。

基金项目:河南省科技攻关项目(编号:202102110135, 212102110347)

作者简介:张鹏辉,男,河南科技学院在读硕士研究生。

通信作者:周浩宇(1985—),女,河南科技学院讲师,博士。

E-mail: zhouhaoyu0618@163.com

收稿日期:2020-12-06

研究^[31]显示,淀粉类食材具有假塑性流体特征,是一种很有潜力的 3D 打印材料。不同来源的淀粉因其淀粉含量及其结构性质的差异表现出不同的打印精度及打印特性。小麦淀粉糊化成团后具有较低的黏度、较好的挤出性能和贮藏性能,用小麦淀粉制作的 3D 打印产品精度最好,添加黄油^[27]和橄榄油^[28]等脂类物质可以降低面团的黏度,进一步提高打印特性。马铃薯淀粉样品的边缘因为粘连而不完整,打印精度较低;通过添加食用胶及蛋白可明显改善马铃薯等淀粉的质构特性和打印特性。如加入豌豆蛋白可以促进马铃薯淀粉颗粒之间的交联,使其硬度增加、打印效果提升^[31];添加 k 型卡拉胶和黄原胶可以使马铃薯淀粉打印样品表面变得光滑,提高打印精度^[32-33]。总体而言,淀粉类食材随着淀粉含量的升高,其打印高度会相应提高,说明维持形状的能力升高。这可能是由于淀粉的支链结构富含强烈吸引水分子的羟基,有很强的结合水分子的能力,提高了其表观黏度,从而降低了样品打印后坍塌的可能性。但是,当淀粉含量高于某一阈值必将导致材料的挤压性下降,最终出料不连续及打印精度差等现象频繁出现。

1.2 亲水胶体类材料

亲水胶体主要是指含有大量亲水基团的大分子多糖类物质,也包括少量的蛋白质。亲水胶体一般具有较大的黏性和一定的凝胶特性,在一定条件下具有挤压成型的特点,因而具备作为 3D 打印材料的潜质。亲水胶体类

食品打印材料及其影响因素见表 2。

随着亲水胶体添加量的增加,所有样品的硬度均显著增加,凝胶强度增强。卡拉胶和明胶^[35]、海藻酸钠^[36]在挤出过程中会破裂,黄原胶^[16]完全水合需要的时间长,导致打印精度低、再现性差。甲基纤维素^[34]表现出了良好的打印特性,而且在 5%~14% 的添加范围内均能打印,且添加量越高,稳定性越好。而理想的适合三维打印的凝胶体系应该具有紧密的三维网络结构、适当的凝胶强度和黏度。当凝胶添加量较低时,材料表现出较好的流动性,打印后无法保持立体结构;而当组分添加量较高时,凝胶表现出明显的固体特征,挤出过程中胶体破裂,无法成型。当组分添加量适中时,凝胶能够顺利地被挤出并保持产品的形状及结构,得到的打印样品与打印模型最为接近,打印精度高。

1.3 肉类材料

肉类食品打印材料及其影响因素如表 3 所示。

肉是人类主要的蛋白质来源之一。传统的肉制品加工过程中,经过二次切割的肉类或肉类产品在加工过程中产生的副产品均可以用于 3D 打印。这大大提高了肉类的利用率,还可以缩减产品生产的中间环节,最大程度避免食物在加工、运输、包装等环节的损耗^[39]。

目前,肉类打印食材都是采用肉糜形式、基于挤出成型的方式进行 3D 打印。然而,肉制品由于含有肌纤维蛋白,不易从打印机喷头处挤出。而微生物谷氨酰胺转氨

表 1 淀粉类食品打印材料及其影响因素

Table 1 Starch food printing materials and its influencing factors

材料	成型机制	打印精度	影响因素	文献
小麦粉	面团挤出成型	较高	淀粉含量、面筋含量、流变特性	[19,27-28]
玉米淀粉	糊化挤出成型	一般	淀粉粒径、流变特性	[29-30]
马铃薯淀粉	糊化挤出成型	较低	淀粉类型、流变特性	[31-33]

表 2 亲水胶体类食品打印材料及其影响因素

Table 2 Hydrophilic colloidal food printing materials and its influencing factors

材料	成型机制	打印精度	影响因素	文献
甲基纤维素	凝胶挤出成型	较高	凝胶强度、流变特性	[34]
k-卡拉胶、明胶	凝胶挤出成型	较低	凝胶强度、流变特性	[35]
海藻酸钠	凝胶挤出成型	较低	凝胶强度、流变特性	[36]
黄原胶、葡甘聚糖	凝胶挤出成型	较低	凝胶强度、流变特性	[16]

表 3 肉类食品打印材料及其影响因素

Table 3 Meat products printing materials and its influencing factors

材料	成型机制	打印精度	影响因素	文献
鱼糜	凝胶挤出成型	较高	水分含量、黏弹特性	[37-39]
牛肉	凝胶挤出成型	较低	脂肪含量、黏弹特性	[40]
猪肉	凝胶挤出成型	较低	水分含量、表观黏度	[41]

酶^[37]和 NaCl^[38]可以降低鱼糜的黏度和凝胶强度^[42],使其更容易从打印机喷头处挤出,NaCl 还可以提高鱼糜的保水性,使打印制品更鲜嫩。Dick 等^[40]研究发现,与对照组相比,添加不同量的脂肪可显著降低牛肉打印制品

以及熟化后打印制品的硬度,使其更适于有吞咽困难的人群食用。

1.4 其他食品材料

其他食品类型打印材料及其影响因素如表 4 所示。

表 4 其他食品类型打印材料及其影响因素

Table 4 Other food materials and their influencing factors

材料	成型机制	打印精度	影响因素	文献
牛奶浓缩蛋白	凝胶挤出	较高	流变特性、凝胶强度	[43]
起司	熔融挤出	较高	温度	[44]
巧克力	熔融挤出	较高	温度	[45]
菠菜粉	成糊挤出	一般	菠菜粉颗粒大小	[46]
番茄	成糊挤出	较低	番茄酱干物质含量、流变特性	[47]
蓝莓	成糊挤出	较低	蓝莓干物质含量、流变特性	[48]

除单一组分食品材料外,还可使用几种食品材料混合物进行 3D 打印。如控制好巧克力^[43]和起司^[45]的打印温度可以实现较高精度的打印。牛奶浓缩蛋白^[43]、番茄^[47]和蓝莓^[48]的打印特性与打印糊料中干物质含量有关,且在一定范围内,干物质含量越高,打印精度越高,但各材料的打印精度差别较大,可能是因为牛奶浓缩蛋白可以形成紧密、稳定的蛋白网络支撑打印后制品的结构。菠菜粉^[43]不能直接进行打印,但添加黄原胶后可以打印成型,其打印精度与菠菜粉颗粒大小有关,颗粒越小,打印效果越好。

综上,3D 打印食品的原料需制成液态或糊状的食材,一些传统原料在打印过程中会出现一些质量问题,如面粉糊打印时会产生喷头堵塞,导致打印精度降低。此外,多数食品原材料的特性限制了其在挤出 3D 打印中的应用,需进行技术改进,如通过改善食品原材料的流变特性、质构特性和机械强度可以提高其 3D 打印特性和打印精度。

2 打印参数对 3D 打印制品的影响

除食品原料本身外,3D 打印机的打印参数对打印效果也有重要影响。打印参数主要包括打印速度、打印温度、内部填充率和打印喷头直径等。

2.1 打印速度

打印速度是指打印机喷头在打印过程中沿 X、Y、Z 轴移动的速度。打印速度越快,打印物体所需的时间越短,打印速度还会影响制品的打印精度^[27]。Yang 等^[25]研究发现,当打印速度为 20 mm/s 时,打印制品呈最不规则的结构,可能是受面团黏度的影响;当打印速度过高(30 mm/s)时,打印制品的边角不能被完整打出,挤出的细丝还可能因为拖拽而断裂,导致打印制品与模型有较大偏差(图 1)。Dong 等^[36]研究发现,打印速度过快会引发产品挤出长丝的拖拽甚至断裂;速度过低则导致流动不稳定,引起纹理模糊,纵断面和微观结构显示过高或过

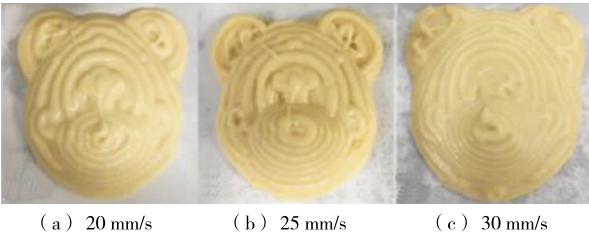


图 1 打印速度对烘焙面团打印效果的影响^[25]

Figure 1 Effects of different printing speeds on the printing results of baked dough

低的打印速度会导致打印制品间隙不均匀。

2.2 打印温度

何芃等^[17]研究发现,打印温度越低,冷却时间越短,巧克力越不容易挤出,甚至堵塞喷头;若温度过高,巧克力挤出后不能及时凝固成型,甚至融化已经沉积的部分,对打印精度造成不利影响。Warner 等^[33]研究发现,打印温度对卡拉胶打印特性和打印精度的影响极为显著,当打印温度为凝胶温度时,挤出的制品能及时胶凝并沉积在上一层,误差较小;当打印温度高于凝胶温度时,挤出的制品不能及时胶凝;当打印温度低于凝胶温度时,打印制品胶体破碎,不能形成完整的立体结构;故只有在凝胶温度时才能进行打印,与 García-Segovia 等^[16]的结论类似。

2.3 内部填充率

内部填充率对打印制品的外观影响较大,填充率越低,打印物体所需的时间越短;填充率越高,打印物体的机械强度越高,所需的原材料也越多^[31]。Liu 等^[26]研究了填充率对烘焙面团打印品质的影响(见图 2),不同填充率下,3D 打印制品均能成型,但随着打印高度的增加,打印制品的变形程度有所不同。较小的内部填充率(10%和 30%)不能提供足够的力来维持打印品的形状;而较大的内部填充率(70%和 100%)导致打印制品内部

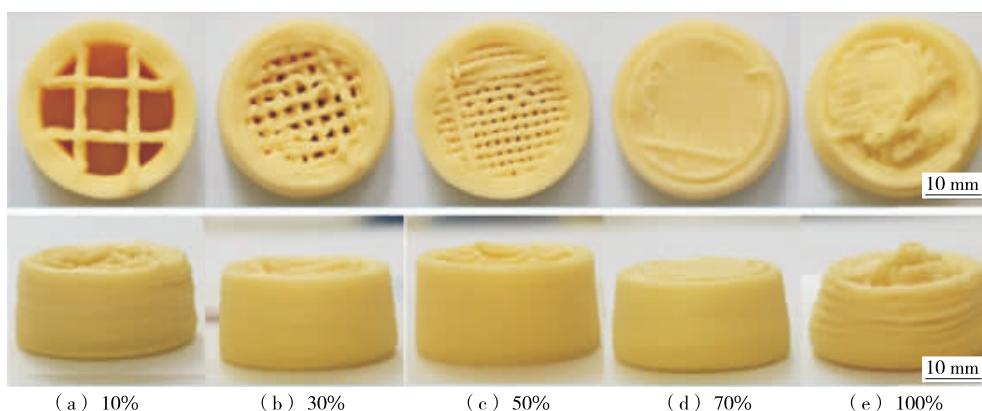
图 2 填充率对焙烤面团打印效果的影响^[26]

Figure 2 Effects of different filling rates on the printing results of baked dough

面团堆积并最终影响打印精度,还会导致打印制品质量较大从而影响其高度。当填充率为 50% 时,既提供了足够维持打印制品结构的力,内部又不过度堆积,因而打印精度较好。

2.4 打印喷头直径

打印喷头直径决定了挤出食品原料细丝的直径,影响打印制品的表面平滑度和打印精度,是影响打印时间和打印精度的重要参数。Liu 等^[26]研究发现,当打印喷头直径为 2.0 mm 时,打印制品有最佳的打印精度,而打印喷头直径为 0.8 mm 时的打印效果最差。这可能是因为较小的打印喷头直径可提高打印制品的光滑度和尺寸精度,但会增加材料在喷嘴处承受的压力,使样品不易从喷头处挤出。Liu 等^[28]研究了喷头直径(1.0, 1.5, 2.5 mm)对明胶、玉米淀粉、鸡蛋清蛋白混合物打印特性的影响,随着喷头直径的增加,挤压压力逐渐减小,但打印制品的尺寸分辨率和表面质量变差。

3 结论

目前,真正适用于 3D 打印的食品材料还比较有限,在使用的方便性、产品的打印精度和模型图案的适应程度等方面能与巧克力媲美的材料还比较少,尤其是很多食材在打印后还需要进一步熟化处理,在此过程中打印制品的外观形状、精细程度会发生变化。因此,对于 3D 打印食材的系统深入研究和挖掘,打印工艺参数的优化改良,打印设备功能和品质的进一步提升,都将对食品 3D 打印技术的推广应用产生重要影响,也是科研工作者努力攻关的方向。

参考文献

[1] 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.
[2] GODOI F C, PRAKASH S, BHANDARI B R, et al. 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects [J].

Journal of Food Engineering, 2016, 179: 44-54.

[3] 杨来侠,杨繁荣,桂玉莲,等. 基于可食用材料的 3D 打印技术应用进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 147-151.
[4] GHOLAMIPOUR-SHIRAZI A, NORTON I T, MILLS T. Designing hydrocolloid based food-ink formulations for extrusion 3D printing[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 161-167.
[5] BALEMANS C, LOOIJMANS S F, GROSSO G G, et al. Numerical analysis of the crystallization kinetics in SLS[J]. Additive Manufacturing, 2020, 33: 101126.
[6] WENG Zi-xiang, ZHOU Yu, LIN Weng-xiong, et al. Structure-property relationship of nano enhanced stereolithography resin for desktop SLA 3D printer[J]. Composites Part A: Applied Science & Manufacturing, 2020, 88: 20169.
[7] BI Hong-jie, REN Ze-chun, YE Gao-yuan, et al. Fabrication of cellulose nanocrystal reinforced thermoplastic polyurethane/polycaprolactone blends for three-dimension printing self-healing nanocomposites[J]. Cellulose, 2020, 27(14): 8 011-8 026.
[8] GOMES C M, RAMBO C R, OLIVEIRA A P N D, et al. Colloidal processing of glass: Ceramics for laminated object manufacturing[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2010, 92: 1 186-1 191.
[9] LIU Zhen-bin, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. 3D printing: Printing precision and application in food sector[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 88(12): 83-94.
[10] 张一帆,张佳颖,徐铭恩,等. 基于同轴细胞打印双网络生物墨水优化及类血管支架的打印[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(22): 3 553-3 558.
[11] 安国进. 金属增材制造技术在航空航天领域的应用与展望[J]. 现代机械, 2019(3): 39-43.
[12] 林家超,吴雄,杨文,等. 3D 打印建筑材料性能影响因素与分析研究[J]. 新型建筑材料, 2017, 44(10): 62-65.
[13] 张德龙,张昊,张晓刚,等. 3D 打印铸造模型的应用研究与展望[J]. 现代制造技术与装备, 2019(11): 142-144.
[14] 冯传兴,周泉城. 马铃薯淀粉 3D 打印工艺及其 3D 打印结构的研究[J]. 现代食品科技, 2017(9): 183-188.
[15] VADODARIA S, MILLS T. Jetting-based 3D printing of edible

- materials[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 106: 105857.
- [16] GARCÍA-SEGOVIA P, GARCÍA-ALCARAZ V, BALASCH-PARISI S, et al. 3D printing of gels based on xanthan/konjacgums[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2020, 64: 102343.
- [17] 何芃, 郭韵, 欧阳叶郁, 等. 基于巧克 FDM 力工艺的 3D 打印技术的研究[J]. *软件*, 2020, 41(1): 36-41.
- [18] JIANG Hao, ZHENG Lu-yao, ZOU Yan-hui, 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.
- [19] 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.
- [20] VOON S L, AN J, WONG G, et al. 3D food printing: A categorised review of inks and their development[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2019, 14: 1-16.
- [21] 高海生. 3D 打印的发展现状及前景展望[J]. *中国战略新兴产业*, 2017(44): 32.
- [22] 徐书洁. 3D 打印人造牛肉的关键技术研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2017: 33-34.
- [23] ALAIN L B, CHIEREGATO M B, PATRICIA L B. 3D printing of foods: Recent developments, future perspectives and challenges[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2020, 14: 1603508.
- [24] 雍雅萍, 高翠霞, 王艳茹, 等. 不同品种小麦粉品质特性对馒头品质的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(11): 27-32, 62.
- [25] 石晶红, 郝水源, 郭淑文. 山药薏米芡实混合粉对小麦粉加工品质的影响[J]. *食品与机械*, 2021, 37(1): 199-203.
- [26] 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.
- [27] YANG Fan, ZHANG Min, FANG Zhong-xiang, et al. Impact of processing parameters and post-treatment on the shape accuracy of 3D-printed baking dough[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2019, 54(1): 68-74.
- [28] LIU Yao-wen, LIANG Xue, AHMED S, et al. Properties of 3D printed dough and optimization of printing parameters[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 54: 9-18.
- [29] 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.
- [30] LIU Li-li, MENG Yuan-yuan, DAI Xiao-ning, et al. 3D Printing complex egg white protein objects: Properties and optimization[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12: 267-279.
- [31] FENG Chuan-ning, WANG Qi, LI Hui, 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): 1-10.
- [32] LIU Zhen-bin, ZHANG Min, BHANDARI B. Effect of gums on the rheological, microstructural and extrusion printing characteristics of mashed potatoes[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 117: 1 179-1 187.
- [33] LIU Zhen-bin, BHANDARI B, PRAKASH S, et al. Creation of internal structure of mashed potato construct by 3D printing and its textural properties[J]. *Food Research International*, 2018, 111(9): 534-543.
- [34] 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.
- [35] WARNER E L, NORTON I T, MILLS T B. Comparing the viscoelastic properties of gelatin and different concentrations of kappa-carrageenan mixtures for additive manufacturing applications[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 246: 58-66.
- [36] 骆云龙, 马志勇, 张家彬, 等. 基于琼脂-明胶颗粒的海藻酸钠三维打印工艺研究[J]. *机械制造*, 2019, 57(8): 71-75.
- [37] DONG Xiu-ping, PAN Yu-xi, ZHAO Wen-yu, et al. Impact of microbial transglutaminase on 3D printing quality of *Scomberomorus niphonius surimi* [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 124: 109123.
- [38] WANG Lin, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 101-108.
- [39] DONG Xiu-ping, HUANG Ying, PAN Yu-xi, et al. Investigation of sweet potato starch as a structural enhancer for three-dimensional printing of *Scomberomorus niphonius surimi* [J]. *Journal of Texture Studies*, 2019, 50: 316-324.
- [40] DICK A, BHANDARI B, PRAKASH S, et al. Post-processing feasibility of composite-layer 3D printed beef[J]. *Meat Science*, 2019, 153: 9-18.
- [41] DICK A, BHANDARI B, DONG X, et al. Feasibility study of hydrocolloid incorporated 3D printed pork as dysphagia food[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 107: 105940.
- [42] 王伯华, 龙娇丽, 雷颂, 等. 谷氨酰胺转氨酶及辅料对珍珠蚌肉糜凝胶性质的影响[J]. *食品与机械*, 2016, 32(9): 12-16.
- [43] LIU Yao-wei, YU Yun, LIU Chang-shu, et al. Rheological and mechanical behavior of milk protein composite gel for extrusion-based 3D food printing[J]. *LWT*, 2019, 102: 339-346.
- [44] 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.
- [45] 肖俊勇, 占密勤, 从仁怀, 等. 含中药功能因子巧克力 3D 打印成型性研究[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(5): 77-82.
- [46] 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.
- [47] ZHU Si-cong, STIEGER M A, ATZE J D G, et al. Extrusion-based 3D printing of food pastes: Correlating rheological properties with printing behaviour[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 58: 102214.
- [48] 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.