

打印参数对未漂洗鲟鱼糜凝胶3D打印成型效果的影响

向晨曦，李钰金，高瑞昌，白帆，汪金林，赵元晖

Effect of Printing Parameters on the 3D Printing Molding Effect of Unrinsed Sturgeon Surimi Gel

XIANG Chenxi, LI Yujin, GAO Ruichang, BAI Fan, WANG Jinlin, and ZHAO Yuanhui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040100>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山药凝胶体系的3D打印特性

3D Printing Characteristics of Yam Gel

食品工业科技. 2021, 42(23): 1–7

葡萄糖酸内酯酸化处理对未漂洗鲟鱼糜凝胶特性的影响

Effect of Glucono- δ -lactone Acidification Treatment on the Gel Properties of Unrinsed Sturgeon Surimi

食品工业科技. 2021, 42(22): 99–104

含中药功能因子巧克力3D打印成型性研究

Study on the 3D Printing Formability of Chocolate with Chinese Medicine Functional Factor

食品工业科技. 2019, 40(5): 77–82

3D食品打印技术及影响因素的研究进展

Research Progress of 3D Food Printing and Its Influencing Factors

食品工业科技. 2019, 40(24): 338–343,348

基于食品3D打印技术的食品原料研究及应用

Research and Application of Food Raw Materials Based on Food 3D Printing Technology

食品工业科技. 2021, 42(8): 1–7

超高压对未漂洗金线鱼鱼糜凝胶特性的影响

Effect of Ultra-high Pressure on Gel Properties of Unwashed *Nemipterus virgatus* Surimi

食品工业科技. 2021, 42(1): 42–47,53



关注微信公众号，获得更多资讯信息

向晨曦, 李钰金, 高瑞昌, 等. 打印参数对未漂洗鲟鱼糜凝胶 3D 打印成型效果的影响 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 1–8. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040100

XIANG Chenxi, LI Yujin, GAO Ruichang, et al. Effect of Printing Parameters on the 3D Printing Molding Effect of Unrinsed Sturgeon Surimi Gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 1–8. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040100

· 未来食品 ·

打印参数对未漂洗鲟鱼糜凝胶 3D 打印成型效果的影响

向晨曦^{1, +}, 李钰金^{1, +}, 高瑞昌², 白帆³, 汪金林^{3,*}, 赵元晖^{1,*}

(1. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 山东青岛 266003;
2. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013;
3. 衢州鲟龙水产食品科技开发有限公司, 浙江衢州 324000)

摘要:为进一步提高未漂洗鲟鱼糜凝胶的打印质量, 本文探究了打印速度、分层高度、填充密度、喷嘴直径、挤出程度和温度等相关打印参数对鱼糜凝胶 3D 打印成型效果的影响, 并进行了打印精度评价。结果表明, 分层高度要与喷嘴直径相同或略低于喷嘴直径, 分层高度、喷嘴直径和打印速度越大, 打印效率越高。综合打印效果和打印效率可确定最佳打印参数为喷嘴直径 1.20 mm、分层高度 1.2 mm、填充密度 100%、挤出程度 100%、打印速度 25 mm/s 和温度 25 °C。在此打印参数下, 打印鱼糜结构紧密, 成型性好, 打印精度高, 可获得高质量的 3D 打印鱼糜。

关键词:3D 打印, 未漂洗鱼糜, 打印参数, 成型效果

中图分类号: TS254.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)02-0001-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040100



本文网刊:

Effect of Printing Parameters on the 3D Printing Molding Effect of Unrinsed Sturgeon Surimi Gel

XIANG Chenxi¹, LI Yujin^{1,+}, GAO Ruichang², BAI Fan³, WANG Jinlin^{3,*}, ZHAO Yuanhui^{1,*}

(1. School of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. School of Food and Bioengineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;

3. Quzhou Sturgeon Aquatic Food Technology Development Co., Ltd., Quzhou 324000, China)

Abstract: In order to further improve the printing quality of unwashed sturgeon surimi gel, this paper explored the influence of printing parameters such as printing speed, layering height, filling density, nozzle diameter, extrusion degree and temperature on the 3D printing effect of surimi gel, and evaluated the printing accuracy. The results showed that the layering height should be the same as or slightly lower than the nozzle diameter, and the higher the layering height, nozzle diameter and printing speed were, the higher the printing efficiency was. Based on the comprehensive printing effect and printing efficiency, the optimal printing parameters were determined as nozzle diameter 1.20 mm, layering height 1.2 mm, filling density 100%, extrusion degree 100%, printing speed 25 mm/s and temperature 25 °C. Under these printing parameters, the structure of the printed surimi was tight, and the formability was good and the printing accuracy was high, which could obtain high-quality 3D printing surimi.

Key words: 3D printing; unrinsed surimi; printing parameters; molding effect

收稿日期: 2021-04-12 +并列第一作者

作者简介: 向晨曦 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品高值化利用, E-mail: xcx17860826883@163.com。

李钰金 (1966-), 男, 博士, 研究方向: 海洋生物资源高效利用, E-mail: liyujin@ouc.edu.cn。

* 通信作者: 汪金林 (1986-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 水产品加工与贮藏, Email: wjl635280708@126.com。

赵元晖 (1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品高值化利用, E-mail: zhaoyuanhui@ouc.edu.cn。

3D 食品打印技术是一种先进的制造技术,通过增材制造工艺可以生产具有定制形状和结构的3D 食品^[1-2]。目前挤压式 3D 打印技术是食品打印中应用最广泛的方法,可以制作出许多精美复杂的结构。3D 打印产品的最终成型质量受到打印材料特性和打印工艺参数两个主要因素的制约^[3]。打印材料特性是材料可打印性的关键,而打印参数则对打印结构的稳定性和成型精度等有很大的影响^[4-5]。在挤压式 3D 打印过程中,打印原料和打印结构复杂程度的不同会使得获得最佳打印效果时的打印参数不同,需要根据实际情况来对打印参数进行调节以提高打印质量^[6]。Severini 等^[7]研究了小麦面团打印过程中的打印变量,发现层高值对打印质量有显著影响,过高或过低均会导致打印样品精度下降,并得出打印速度 30 mm/s、喷嘴直径 0.6 mm、层高值为 0.4 mm 时效果最佳的结果。Yang 等^[5]研究结果表明将打印工艺参数设置为优化出的最佳参数时可得到与模型最为接近的打印样品。金立明等^[8]探究了不同打印参数对白鲢鱼糜凝胶打印效果的影响,为后续通过调整打印参数来提高打印品质提供参考。

对于本实验中使用的活塞挤压式 3D 打印机,涉及到的打印参数主要有打印速度、喷嘴直径、分层高度、温度、填充密度以及挤出程度等。挤压式 3D 食品打印发展前景良好,但由于有些食品原料不能直接用于打印或打印质量不高等限制因素导致其仍无法具有广泛适用性^[9]。因此,有必要开发出更多可以用于 3D 打印的食品原料。而鱼糜凝胶由于具有一定的粘弹性和凝胶强度满足 3D 打印对原料特性的要求,是 3D 食品打印的理想原料^[10]。本文以前期实验得到的适用于 3D 打印的未漂洗鲟鱼糜凝胶为打印原料,通过调整打印速度、喷嘴直径、温度和挤出程度等相关打印参数,探究这些参数对打印成型效果的影响,优化出最佳打印参数,旨在提高 3D 打印鱼糜的质量,进一步扩大 3D 打印在食品领域中的应用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜鲟鱼 史氏鲟和西伯利亚鲟杂交的幼年鲟鱼,体长约 70 cm,体重约 2 kg,购买于青岛市城阳区水产养殖公司;食盐 食品级,青岛金贝欧公司;山梨糖醇、三聚磷酸钠、葡萄糖酸内酯、海藻酸钠 食品级,河南万邦实业有限公司。

TJ12-H 绞肉机 广东恒联食品机械有限公司;SY-5 斩拌机 广州市善友机械设备有限公司;FMB40 雪花制冰机 上海冠森生物科技有限公司;SHINNOVE 食品 3D 打印机 杭州时印科技有限公司;JD500-2 型电子天平 沈阳龙腾电子称量仪器有限公司;BD-126W 冰箱 青岛海尔电器集团。

1.2 实验方法

1.2.1 鱼糜的制备 将新鲜的鲟鱼去掉鱼头、鱼内脏和鱼皮,清洗后取下鱼肉切成小块,再将小块鱼肉置于绞肉机中绞碎,不经过漂洗、脱水等步骤,直接

添加传统抗冻剂(0.25% 三聚磷酸钠和 4% 山梨醇)并搅拌均匀,即为未漂洗鲟鱼糜。最后将鱼糜分装进自封袋中(每袋 300 g)并放在-20 °C 下冷冻,两周内完成实验。

1.2.2 鱼糜凝胶的制备 将冷冻的未漂洗鲟鱼糜取出在 4 °C 下解冻,空擂 2 min,然后添加 0.5% 海藻酸钠(以冷冻鱼糜质量计,下同)、1.5% 食盐、1% 葡萄糖酸内酯以及冰水继续擂溃 2 min,鱼糜中水分含量控制在 80% 左右,整个过程中鱼糜温度低于 10 °C。最后在 4 °C 下放置 24 h 形成凝胶^[11]。

1.2.3 打印参数设置 本实验中使用活塞挤压式 3D 打印机完成打印过程。通过在切片软件(CURA 15.02.1)中加载出打印模型的 STL 文件,然后在切片软件页面设置打印模型的尺寸以及相关打印参数。设置完打印参数后,将模型保存为 G-code 文件,以便 3D 打印机可以识别切片信息并完成打印。切片软件中打印参数和模型尺寸的设置界面见图 1。

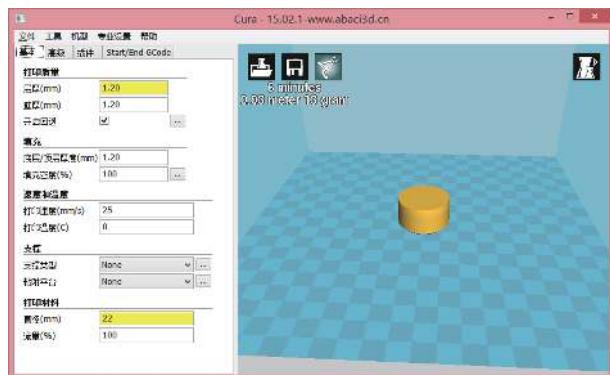


图 1 切片软件中打印参数和模型尺寸的设置界面

Fig.1 Setting interface of printing parameters and model size in slice software

在打印过程中主要调整以下参数:

分层高度: 喷嘴直径为 1.20 mm, 打印速度为 25 mm/s, 填充密度为 100%, 挤出程度为 100%, 温度为 25 °C, 调整分层高度分别为 0.6、0.8、1.2、1.6 和 2.0 mm。

喷嘴直径: 打印速度为 25 mm/s, 填充密度为 100%, 挤出程度为 100%, 温度为 25 °C, 使用的喷嘴直径分别为 0.84、1.20 和 1.55 mm。

打印速度: 分层高度为 1.20 mm, 喷嘴直径为 1.20 mm, 填充密度为 100%, 挤出程度为 100%, 温度为 25 °C, 调整打印速度分别为 15、20、25、30 和 35 mm/s。

填充密度: 分层高度为 1.20 mm, 喷嘴直径为 1.20 mm, 打印速度为 25 mm/s, 挤出程度为 100%, 温度为 25 °C, 调整填充密度为 20%、40%、60%、80% 和 100%。

挤出程度: 分层高度为 1.20 mm, 喷嘴直径为 1.20 mm, 填充密度为 100%, 温度为 25 °C, 打印速度为 25 mm/s, 调整挤出程度为 60%、80%、100%、120% 和 140%。

温度: 分层高度为 1.20 mm, 喷嘴直径为 1.20 mm,

填充密度为 100%, 挤出程度为 100%, 打印速度为 25 mm/s, 调整温度为 25、30、35、40 和 45 °C。

1.2.4 打印效果及精度评价 打印参数按照上述设置, 打印模型设定为直径为 30 mm、高度约为 16 mm 左右(具体随打印层数和分层高度而定)的圆柱体。打印完成后立即拍摄照片以便评估打印质量, 并用游标卡尺测量实际打印样品的直径和高度, 按照如下公式计算直径偏差和高度偏差^[12]。

$$\text{偏差}(\%) = (\text{实际值} - \text{模型值}) / \text{模型值} \times 100$$

1.3 数据处理

使用 IBM SPSS Statistics 24 计算平均值并进行 Duncan 检验和显著性分析($P<0.05$), 图表均使用 Origin 2017 进行绘制。每个样品至少重复打印 3 次。

2 结果与分析

2.1 分层高度对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果和打印精度的影响

分层高度即层厚, 是指打印样品结构中每一层的厚度^[13]。3D 打印过程是通过逐层叠加来完成的, 因此成型后产品表面会出现层与层之间不连续的现象, 称之为“阶梯现象”, 分层高度是产生阶梯效应的主要因素^[14]。分层高度越小, 层与层之间的台阶感越弱, 打印精度越高; 反之, 分层高度越大, 阶梯现象越明显, 表面粗糙感加重, 精度越低^[15]。图 2 是不同分层高度下的打印成型效果图。由图 2 中可以看到, 当层厚值较小, 层与层之间粘合紧密, 成型性好。但是层厚值过低为 0.6 mm 时, 喷嘴在打印时与线条产生摩擦, 导致表面有些粗糙。当层厚值为 0.8 和 1.2 mm 时打印效果优于其他组, 随着层厚值继续增加, 层与层之间界限明显, 打印质量降低, 在层厚值为 1.6 和 2.0 mm 时打印成品出现局部坍塌下沉的现象, 这是由层厚值过大引起每层重量增加导致的结果。

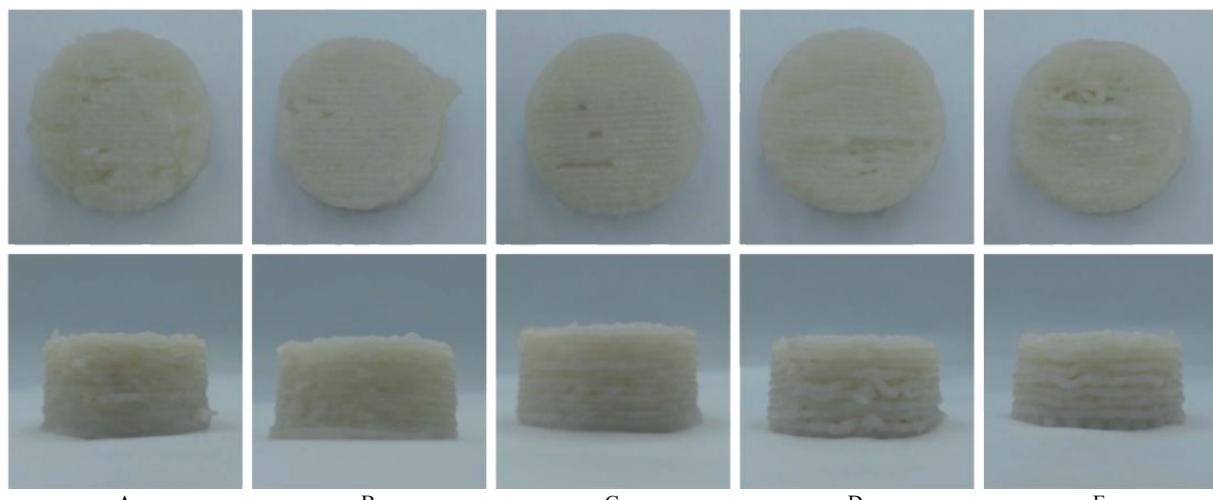


图 2 分层高度对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果的影响

Fig.2 Effect of stratification height on the forming effect of unrinsed sturgeon surimi gel

注: A: 0.6 mm; B: 0.8 mm; C: 1.2 mm; D: 1.6 mm; E: 2.0 mm。

果。Severini 等^[7]发现层高值过高或过低都不利于 3D 打印。

打印偏差的绝对值越小, 打印精度越高。正偏差表示与模型相比偏大, 负偏差表示与模型相比偏小。从表 1 中可以看到, 当分层高度为 1.2 mm 与喷嘴直径大小相同时打印精度最高(直径和高度偏差仅分别为 0.17% 和 0.24%)。分层高度越小, 线条越细, 引起直径负偏差, 同时打印层数越多, 成型所需时间就越长; 反之线条越粗引起正偏差。与层高值 0.6 mm 相比, 1.2 mm 节约了将近一倍的时间。考虑到打印效率, 选择 1.2 mm 是比较合适的。

表 1 分层高度对未漂洗鲟鱼糜凝胶打印精度的影响

Table 1 Effect of stratification height on printing precision of unrinsed sturgeon surimi gel

分层高度(mm)	打印时间(min)	直径偏差(%)	高度偏差(%)
0.6	15.47±0.01 ^a	-1.83±0.10 ^e	1.48±0.13 ^b
0.8	11.60±0.01 ^b	-0.78±0.09 ^d	0.90±0.23 ^c
1.2	7.72±0.01 ^c	0.17±0.07 ^c	0.24±0.16 ^d
1.6	6.07±0.02 ^d	1.43±0.12 ^b	0.94±0.14 ^c
2.0	4.97±0.01 ^e	3.06±0.13 ^a	1.65±0.11 ^a

注: 同一列不同字母代表存在显著性差异($P<0.05$); 表 2~表 6 同。

2.2 喷嘴直径对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果和打印精度的影响

喷嘴直径对打印产品的精度和表面粗糙度有很大影响^[16]。喷嘴直径越小, 线条越细, 打印精度越高, 但对材料要求较高, 容易造成堵塞; 喷嘴直径越大, 出料越流畅, 但同时线条越粗, 导致打印精度低。图 3 显示了三种喷嘴直径尺寸对 3D 打印产品质量的影响。由图可知分层高度与喷嘴直径相差越大越不利于良好的成型效果, 因此设置分层高度与其所对应的喷嘴直径相同。从表面来看, 当喷嘴直径为 0.84 mm 时, 物料挤出困难, 打印结构混乱, 成型效果差; 当喷嘴直径为 1.20 mm 时, 层与层之间能够很好

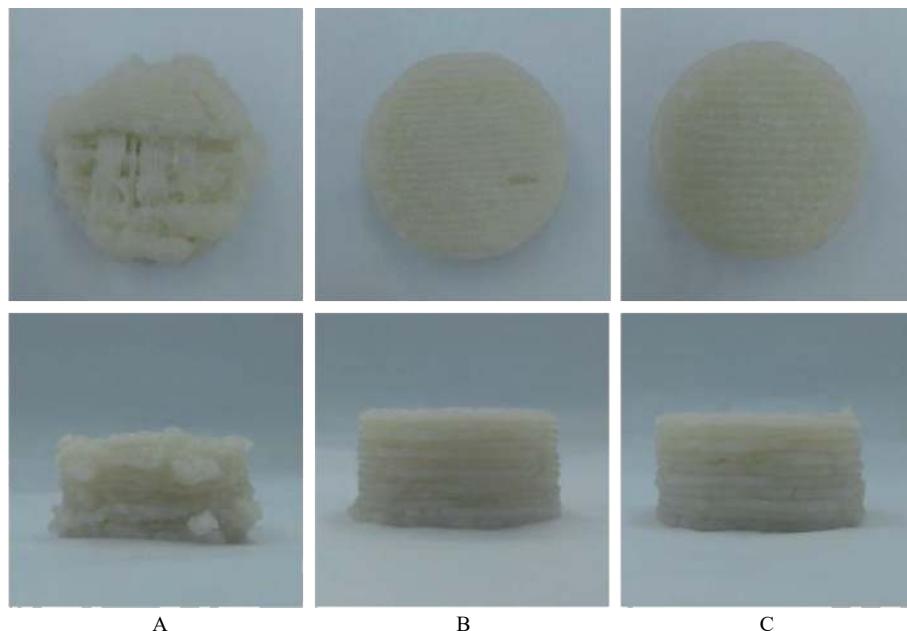


图 3 喷嘴直径对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果的影响

Fig.3 Effect of nozzle diameter on the forming effect of unrinsed sturgeon surimi gel

注: A: 0.84 mm; B: 1.20 mm; C: 1.55 mm。

地融合沉积, 表面光滑; 当喷嘴直径为 1.55 mm 时, 出料连续流畅, 但线条感较重, 阶梯现象明显, 表面粗糙。同时当喷嘴直径较小时, 料筒内挤压力变大, 增加机器负担。

表 2 显示了不同喷嘴直径下打印精度的差异。喷嘴直径为 0.84 mm 时由于出料困难导致成型效果差, 打印精度最低, 与打印效果一致。随着喷嘴直径的增加, 打印偏差减小。1.20 mm 的喷嘴直径打印精度最高, 直径和高度偏差显著低于其他组($P<0.05$)。当喷嘴直径增加到 1.55 mm, 高度偏差增大, 这是由于线条较粗, 堆积重叠性不好, 从而引起高度的增加。此外, 喷嘴直径越小, 打印时间越长。考虑到打印效率和打印质量, 选择 1.20 mm 的喷嘴直径最为合适。

表 2 喷嘴直径对未漂洗鲟鱼糜凝胶打印精度的影响

Table 2 Effect of nozzle diameter on printing precision of unrinsed sturgeon surimi gel

喷嘴直径(mm)	打印时间(min)	直径偏差(%)	高度偏差(%)
0.84	14.32±0.01 ^a	6.01±0.42 ^a	-26.84±1.86 ^b
1.20	7.73±0.01 ^b	0.22±0.06 ^b	0.88±0.22 ^a
1.55	5.67±0.01 ^c	0.27±0.12 ^b	2.60±0.08 ^a

2.3 打印速度对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果和打印精度的影响

一般来说, 喷嘴移动速度与打印质量以及打印效率密切相关^[17]。图 4 显示了打印速度对鱼糜凝胶成型效果的影响。由图可知, 不同打印速度下打印的样品成型效果不同。喷嘴移动速度为 25 mm/s 时, 打印效果最好。当喷嘴移动速度小于 25 mm/s 时, 在打印过程中物料挤出较为缓慢, 导致堆积过度使线条变粗, 打印样品整体形状偏“胖”; 而当速度大于

25 mm/s 时, 容易导致物料挤出的速度跟不上打印速度而产生拉力, 导致线条断裂不连续, 影响打印产品质量。

打印速度对打印时间和成型精度的影响如表 3 所示。由表中可知, 当打印速度为 25 mm/s 时, 打印样品的直径与高度值与模型值最为接近。打印速度继续增加对样品直径无显著影响($P>0.05$), 但是高度上有所增加, 这是因为打印速度过快层与层之间来不及相互融合沉积, 从而导致打印样品实际高度偏大。而打印速度过慢引起线条变粗使得直径和高度增大。打印相同的模型, 不同打印速度的成型时间是不同的。速度越快, 所需打印时间越短, 打印效率越高。因此, 打印速度设置为 25 mm/s 既可以保证一定的打印效率, 又可以获得较高的成型精度。

表 3 打印速度对未漂洗鲟鱼糜凝胶打印精度的影响

Table 3 Effect of printing speed on printing precision of unrinsed sturgeon surimi gel

打印速度(mm/s)	打印时间(min)	直径偏差(%)	高度偏差(%)
15	11.27±0.01 ^a	1.29±0.11 ^a	2.14±0.16 ^a
20	8.93±0.02 ^b	0.61±0.04 ^b	1.50±0.20 ^b
25	7.73±0.02 ^c	0.12±0.03 ^c	0.75±0.08 ^c
30	6.92±0.01 ^d	0.24±0.15 ^c	1.84±0.22 ^{ab}
35	6.38±0.01 ^e	0.13±0.08 ^c	2.12±0.29 ^a

2.4 填充密度对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果和打印精度的影响

填充密度即 3D 打印产品内部填充率, 反映了内部支撑结构, 其大小直接关系到 3D 打印产品能否保持稳定性并维持自身形状^[18]。如图 5 所示, 在 3D 打印过程中测试了填充密度对 3D 打印样品质量的影响。正如成型效果图所示, 填充密度较小(20%)时,

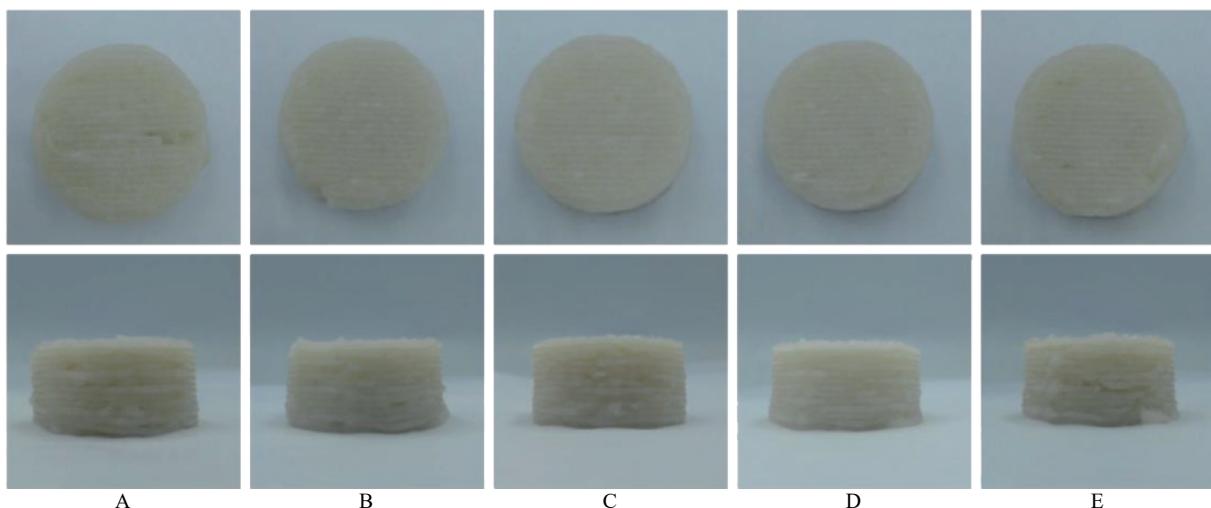


图 4 打印速度对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果的影响

Fig.4 Effect of printing speed on the forming effect of unrinsed sturgeon surimi gel

注: A: 15 mm/s; B: 20 mm/s; C: 25 mm/s; D: 30 mm/s; E: 35 mm/s。

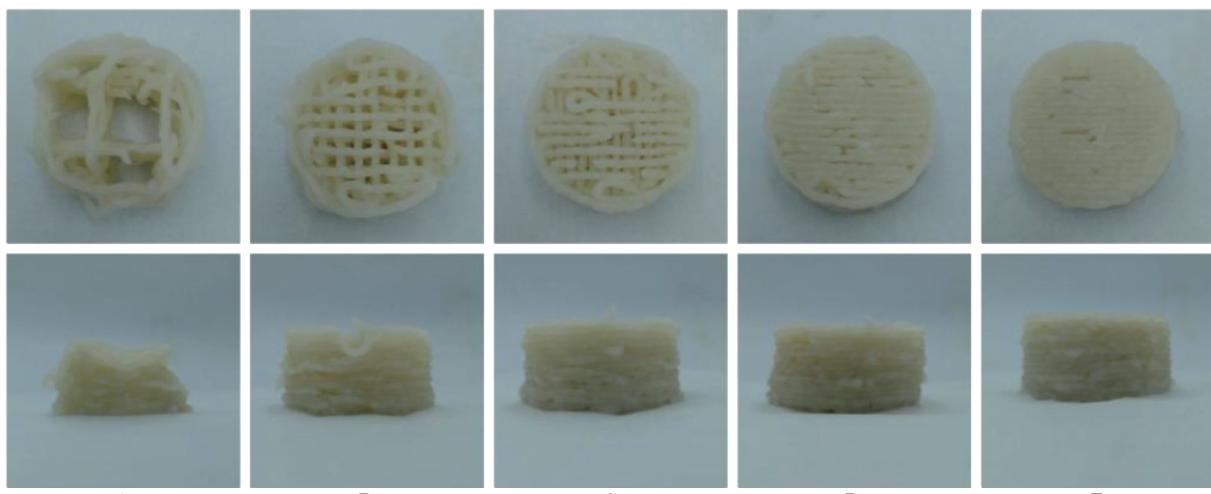


图 5 填充密度对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果的影响

Fig.5 Effect of filling density on the forming effect of unrinsed sturgeon surimi gel

注: A: 20%; B: 40%; C: 60%; D: 80%; E: 100%。

内部结构孔隙太大,会削弱整个样品的支撑强度,无法保持形状固定。填充密度不低于 40% 时均能成功打印,但是对打印质量和打印精度的影响不同。当填充密度为 40% 时,打印路径转折较多,导致打印过程中断条现象严重,内部线条混乱,打印质量较低。随着填充密度进一步增加,断条现象有所缓解,打印产品表面变得光滑,尤其是填充率达到 100% 时,断条率低,打印结构稳定,成型性最好。金立明等^[7]研究发现当填充密度大于 60% 时鲟鱼糜凝胶打印效果较好,且在填充密度达到 100% 时打印分辨率最高。这与本研究结果类似。

为了进一步评估打印质量,测定并计算了打印样品实际尺寸与模型设定尺寸的偏差,如表 4。随着填充密度的增加,直径偏差和高度偏差减小。填充密度超过 60% 后样品具有良好的力学性质,能够支撑自身结构,所以对样品高度不会造成显著性影响($P>0.05$)。虽然当填充密度为 100% 时会带来打印

时间的延长,但打印结构完整,直径和高度偏差显著低于其他组($P<0.05$)。

表 4 填充密度对未漂洗鲟鱼糜凝胶打印精度的影响

Table 4 Effect of filling density on printing precision of unrinsed sturgeon surimi gel

填充密度(%)	打印时间(min)	直径偏差(%)	高度偏差(%)
20	2.90±0.01 ^c	-	-
40	4.68±0.02 ^d	-6.89±0.11 ^c	-1.52±0.57 ^b
60	6.22±0.02 ^c	-2.24±0.15 ^b	0.68±0.18 ^a
80	7.53±0.01 ^b	-2.21±0.10 ^b	0.73±0.49 ^a
100	7.73±0.01 ^a	-0.19±0.06 ^a	0.53±0.17 ^a

2.5 挤出程度对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果和打印精度的影响

图 6 是在不同挤出程度下鱼糜凝胶的打印成型效果图。根据图 6 可知,挤出程度对鱼糜成型性的影响较大,过高或者过低都会降低打印产品的质量。

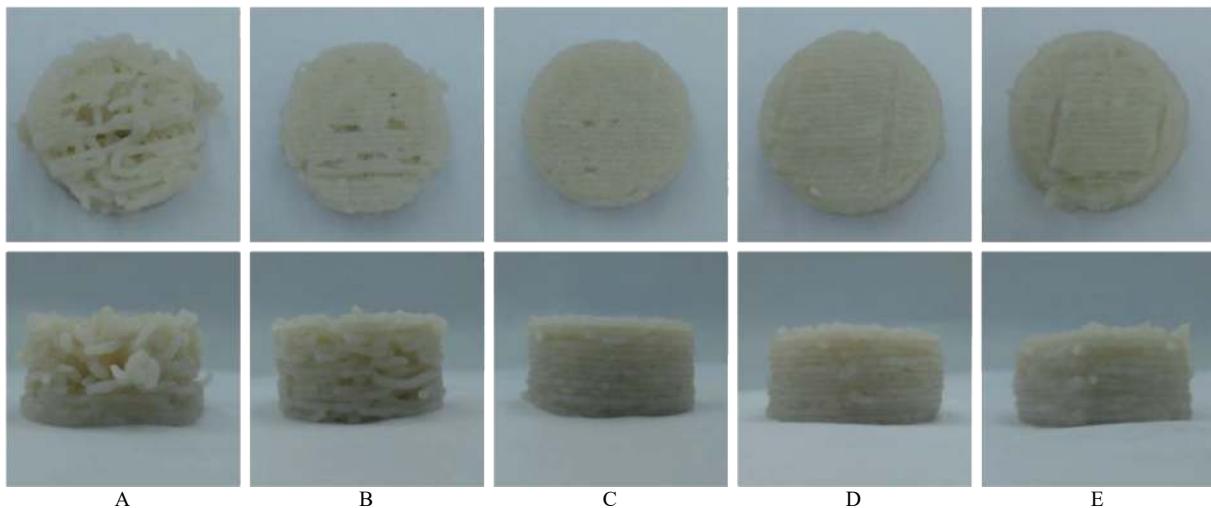


图 6 挤出程度对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果的影响

Fig.6 Effect of extrusion degree on the forming effect of unrinsed sturgeon surimi gel

注: A: 60%; B: 80%; C: 100%; D: 120%; E: 140%。

当挤出程度为 100% 时, 打印样品呈现出最好的成型效果, 线条连续, 打印结构层次清晰。当挤出程度低于 100% 时, 物料挤出不足导致断条率高, 结构混乱, 无法成型, 如图 6A 所示; 而当高于 100% 时, 整体打印效果较好, 但物料过度挤出导致喷嘴移动时会与打印样品表面产生摩擦, 使得外观粗糙, 见图 6D~6E。

挤出程度的不同也带来了打印精度上的差异, 如表 5 所示。随着挤出程度的增大, 样品直径和高度也逐渐增大。挤出程度 100% 时偏差最小, 直径偏差仅为-0.07%, 与模型设定值最为接近。当挤出程度为 80% 时, 物料挤出不足, 导致直径和高度值偏小; 当挤出程度为 120% 时引起物料堆积, 使得直径和高度偏大, 进一步增大挤出程度, 其打印偏差也增大。

2.6 温度对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果和打印精度的影响

鱼糜凝胶是一种具有剪切稀化行为的假塑性流

表 5 挤出程度对未漂洗鲟鱼糜凝胶打印精度的影响

Table 5 Effect of extrusion degree on printing precision of unrinsed sturgeon surimi gel

挤出程度(%)	打印时间(min)	直径偏差(%)	高度偏差(%)
60	7.83±0.01 ^a	-	-
80	7.85±0.01 ^a	-4.31±0.20 ^d	-2.20±0.16 ^d
100	7.85±0.01 ^a	-0.07±0.03 ^c	1.24±0.35 ^c
120	7.83±0.01 ^a	6.51±0.10 ^b	3.57±0.16 ^b
140	7.85±0.01 ^a	9.97±0.10 ^a	5.56±0.30 ^a

体^[19], 温度升高会改变 3D 打印过程中鱼糜浆料的流变特性, 进而影响样品的打印精度和力学性能^[12]。图 7 展示了不同温度对与鱼糜凝胶成型效果及稳定性的影响。从图 7 中可以看出, 当温度为 25 和 30 °C 时, 打印成型效果较好。但是随着温度的升高, 打印质量逐渐下降, 甚至无法成型。当温度为 35 °C 时, 在打印过程中断条现象严重, 表面光滑度下降, 打印

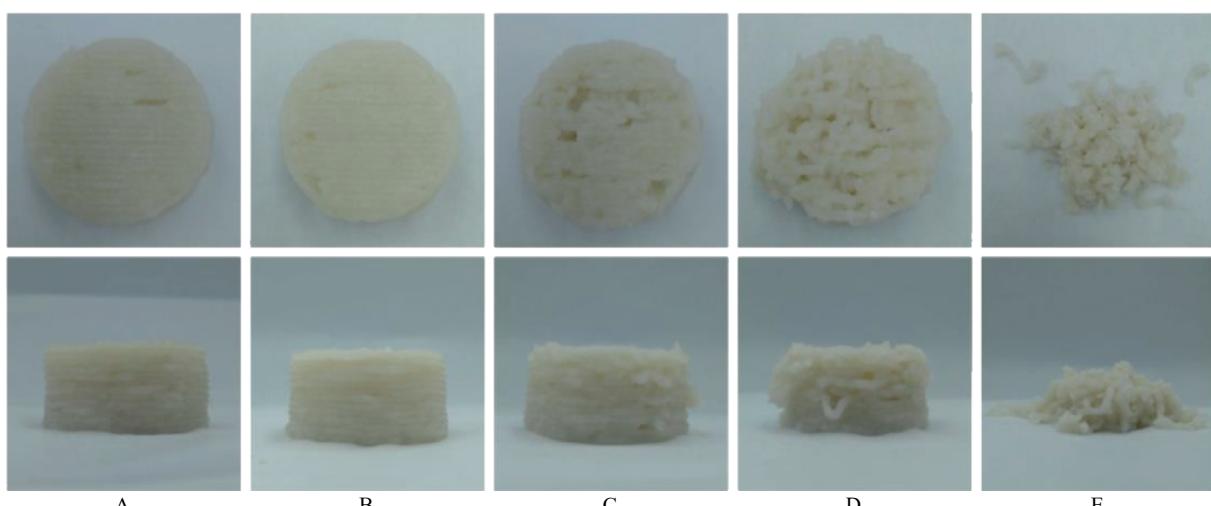


图 7 温度对未漂洗鲟鱼糜凝胶成型效果的影响

Fig.7 Effect of temperature on the forming effect of unrinsed sturgeon surimi gel

注: A: 25 °C; B: 30 °C; C: 35 °C; D: 40 °C; E: 45 °C。

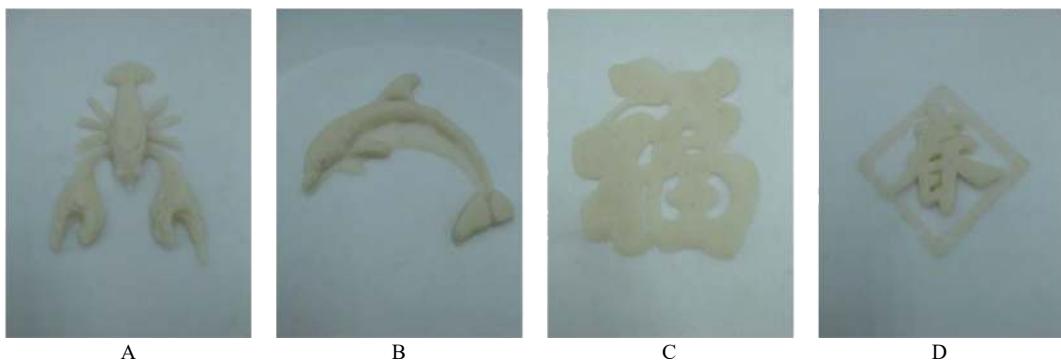


图 8 不同模型打印效果图

Fig.8 Printing effect pictures for different models

注: A: 龙虾; B: 海豚; C: “福”; D: 新春。

质量降低; 而当温度超过 40 °C, 鱼糜粘度降低更为明显, 表现出固态性质, 挤出时断裂严重, 不成线条, 不适合 3D 打印。这可能是由于温度的增加导致鱼糜凝胶内部蛋白分子结构展开, 形成松散的网状结构, 使得鱼糜粘度降低^[12]。

不同温度对鱼糜凝胶打印精度的影响见表 6。从表中可以得知, 随着温度的升高, 直径偏差和高度偏差逐渐增大, 且均为正偏差。当温度在 25~30 °C, 可以获得打印质量和打印精度较高的产品, 25 °C 时直径和高度偏差最小。但温度进一步升高时, 样品打印精度降低。料筒温度超过 40 °C 后, 鱼糜凝胶劣化, 无法打印成型。

表 6 温度对未漂洗鲟鱼糜凝胶打印精度的影响

Table 6 Effect of temperature on printing precision of unrinsed sturgeon surimi gel

温度(°C)	打印时间(min)	直径偏差(%)	高度偏差(%)
25	7.73±0.01 ^a	0.18±0.03 ^c	0.30±0.11 ^c
30	7.73±0.01 ^a	0.26±0.04 ^c	1.07±0.08 ^b
35	7.73±0.01 ^a	1.47±0.26 ^b	2.76±0.19 ^a
40	7.73±0.01 ^a	5.43±0.47 ^a	3.03±0.08 ^a
45	7.73±0.01 ^a	—	—

2.7 打印效果图

通过上述打印参数的优化, 可以确定未漂洗鲟鱼糜凝胶的最佳工艺参数: 喷嘴直径为 1.20 mm, 层高值为 1.20 mm, 打印速度为 25 mm/s, 填充密度为 100%, 挤出程度为 100%, 温度为室温 25 °C。将打印过程中的参数调整为最佳工艺参数, 对几种不同的模型进行打印, 部分效果图如图 8 所示。打印过程中线条流畅, 层与层之间粘合紧密, 打印最终样品结构完整, 表面光滑, 打印效果较好, 与模型基本一致。

3 结论

本研究表明, 打印参数会影响成型效果和稳定性, 从而影响打印产品的质量。喷嘴直径和分层高度之间存在一定的关系, 分层高度为每层打印厚度, 喷嘴直径决定了挤出线条的直径。当层厚值与线条直径相同或略低于线条直径, 可以保证层与层之间很好地沉积粘合; 而当二者相差较大时会明显降低打印样

品的表面精度。未漂洗鲟鱼糜凝胶的最佳打印参数为: 喷嘴直径 1.20 mm、分层高度 1.2 mm、填充密度 100%、挤出程度 100%、打印速度 25 mm/s 和温度 25 °C, 在此打印参数下可获得高打印质量的鱼糜样品。本研究为实现高质量 3D 打印提供理论参考, 并扩大鱼糜凝胶在 3D 食品打印领域中的应用。

参考文献

- [1] 杜姗姗, 周爱军, 陈洪, 等. 3D 打印技术在食品中的应用进展[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(3): 87–93. [DU S S, ZHOU A J, CHEN H, et al. Application progress of 3D printing technology in food[J]. China Agricultural Science and Technology Guide, 2018, 20(3): 87–93.]
- [2] SUN J, HUANG D J, HONG G S, et al. An overview of 3D printing technologies for food fabrication[J]. Food & Bioprocess Technology, 2015, 8(8): 1605–1615.
- [3] 郑小军. FDM 3D 打印制件性能的影响因素分析与试验研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019. [ZHENG X J. Analysis and experimental study on the influence factors of FDM 3D printing parts performance[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.]
- [4] ZHU S, STIEGER M A, VAN DER GOOT A J, et al. Extrusion-based 3D printing of food pastes: Correlating rheological properties with printing behaviour[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 58: 102214.
- [5] 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.
- [6] 黄梦莎. 基于糙米凝胶的挤压式三维打印研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019. [HUANG M S. Research on extrusion 3D printing based on brown rice gel[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.]
- [7] SEVERINI C, DERROSSI 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.
- [8] 金立明, 赵子龙, 焦熙栋, 等. 不同打印条件的鱼糜 3D 打印成型效果分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(5): 214–222. [JIN L M, ZHAO Z L, JIAO X D, et al. Analysis of 3D printing effect of surimi under different printing conditions[J]. Modern Food

- Technology, 2020, 36(5): 214–222.]
- [9] 杨帆, 崔颖, 刘兴训, 等. 淀粉类凝胶三维打印研究进展 [J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(20): 6752–6758. [YANG F, CUI Y, LIU X X, et al. Progress in three dimensional printing of starch gel [J]. Journal of Food Safety and Quality Inspection, 2019, 10(20): 6752–6758.]
- [10] WANG L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 220: 101–108.
- [11] WANG R H, GAO R C, XIAO F, et al. Effect of chicken breast on the physicochemical properties of unwashed sturgeon surimi gels [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 113: 108306.
- [12] 王琳. 鲢鱼糜凝胶体系的挤压式 3D 打印研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2017. [WANG L. Extrusion 3D printing of silver carp surimi gel system [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
- [13] 何新英, 陶明元, 叶春生. FDM 工艺成形过程中影响成形件精度的因素分析 [J]. 机械与电子, 2004(9): 77–78. [HE X Y, TAO M Y, YE C S. Analysis of the factors affecting the precision of parts in FDM process [J]. Machinery and Electronics, 2004(9): 77–78.]
- [14] 杨继全, 徐路钊, 李成, 等. 基于 FDM 工艺的零件成型质量工艺参数研究 [J]. 南京师范大学学报 (工程技术版), 2013, 13(2): 1–6. [YANG J Q, XU L L, LI C, et al. Research on process parameters of part forming quality based on FDM process [J]. Journal of Nanjing Normal University(Engineering Technology Edition), 2013, 13(2): 1–6.]
- [15] 张德龙. 熔融沉积成型 (FDM) 精度影响因素分析及补偿方法探析 [J]. 现代制造技术与装备, 2017(3): 103–104, 106. [ZHANG D L. Analysis of influence factors and compensation method of FDM accuracy [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017(3): 103–104, 106.]
- [16] 林广义, 王权杰, 王祥, 等. FDM 成型中异形喷嘴的设计及对成型精度的影响 [J]. 塑料工业, 2017, 45(11): 75–78, 98. [LIN G Y, WANG Q J, WANG X, et al. Design of special shaped nozzle in FDM forming and its influence on forming accuracy [J]. Plastics Industry, 2017, 45(11): 75–78, 98.]
- [17] LIU Z B, 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: 534–543.
- [18] 李大伟, 戴宁, 姜晓通, 等. 密度感知的 3D 打印内部支撑结构轻量化建模 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(5): 841–848. [LI D W, DAI N, JIANG X T, et al. Lightweight modeling of 3D printing internal support structure based on density perception [J]. Journal of Computer Aided Design and Graphics, 2016, 28(5): 841–848.]
- [19] 王嵬, 杨领, 李学鹏, 等. TG 酶对金线鱼鱼糜 3D 打印效果的影响 [J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(6): 74–81. [WANG W, YANG L, LI X P, et al. Effect of TG enzyme on 3D printing effect of golden thread surimi [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(6): 74–81.]