

植物蛋白肉超声振动 3D 打印方法与试验

葛志优¹, 王羽¹, 高艳娥¹, 蔡维^{1,2*}

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 香港理工大学物流及航运学系, 香港 99907)

摘要: 为提高 3D 打印的植物蛋白肉 (plant protein-based meat, PPM) 产品品质, 该研究通过分析超声振动对植物蛋白凝胶化的作用机理, 引入超声振动辅助, 结合流变特性测试, 开展 3D 打印喷头数值模拟与分析, 探究超声振动对植物蛋白肉凝胶化及 3D 打印过程的影响。通过开发的超声振动 3D 打印装置进行试验, 研究超声振动对 3D 打印植物蛋白肉品质的影响规律。结果表明, 在超声振动作用下, 3D 打印过程中植物蛋白承受更高的剪切应力及挤压应力, 为植物蛋白凝胶化提供有利的物理条件。超声振动 3D 打印产品相较于常规 3D 打印产品, 其硬度下降, 弹性和咀嚼性较为接近, 在硬度、弹性、咀嚼性品质参数稳定性方面的波动程度均低于无超声振动打印样品, 其中在硬度、弹性、咀嚼性品质参数方面的稳定性分别提升 27.75%, 83.14%, 59.30%。该研究将超声振动引入植物蛋白肉 3D 打印过程提升了植物蛋白肉的品质稳定性, 可为后续高品质 3D 打印植物蛋白肉研究与生产提供参考。

关键词: 蛋白质; 植物肉; 3D 打印; 超声振动; 数值模拟

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407158

中图分类号: TS214.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-20-0259-10

葛志优, 王羽, 高艳娥, 等. 植物蛋白肉超声振动 3D 打印方法与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(20): 259-268. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407158 <http://www.tcsae.org>

GE Zhiyou, WANG Yu, GAO Yan'e, et al. Method and experiment of the ultrasonic vibration 3D printing for plant protein-based meat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(20): 259-268. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407158 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着全球人口的增长, 人类对于动物肉类蛋白质主要来源需求不断增加, 动物肉类消费量将达到 3 亿 t^[1], 导致传统畜牧业养殖规模不断扩大^[2]。畜牧养殖已经造成温室气体排放、土地占用、水资源消耗以及生物多样性丧失等严重的资源环境问题^[3-5]。植物蛋白肉 (plant protein-based meat, PPM) 主要来源于农作物 (包括大豆、豌豆、小麦等), 以模仿动物肉类的味道、色泽及质感^[6], 减少脂肪酸与胆固醇摄入^[7], 并极大降低了资源消耗及环境污染^[8-9]。

植物蛋白肉制造工艺经历了从挤压、纺丝、剪切到 3D 打印技术的发展^[10]。其中, 3D 打印技术通过计算机辅助设计与逐层叠加材料的方式, 相较于传统挤压技术、纺丝技术及剪切技术, 可完成多尺度复杂结构制造, 并且因其具备个性化定制形状、质构及成分等各方面的特性, 已受到广泛关注^[11-13]。

随着植物蛋白 3D 打印技术的快速发展, 学者们对 3D 打印植物蛋白肉品质的提升开展了众多研究。王红磊等^[14]研究了不同成分材料的添加对 3D 打印性能及打印

植物肉品质的影响, 并得到最优的豌豆蛋白、结冷胶和谷氨酰胺转氨酶等不同成分比例, 其打印的植物蛋白肉品质得到显著提升。朱益源等^[15]探究了不同豌豆蛋白、魔芋胶及天然胡萝卜粉等不同物料比例对打印性能及微观结构的影响, 并得到与三文鱼品质类似的植物基替代物。LIU 等^[16]分析了乳蛋白复合凝胶的流变性与质构性能, 结果表明蛋白质总含量的增加有利于 3D 打印, 且总蛋白含量为 400~450 g/L 时凝胶 3D 打印性能最佳。CHEN 等^[17]研究了组织化大豆蛋白牛排与鸡胸肉的质构差异, 结果表明填充模式与填充速率参数对打印样品的质构特性有显著影响, 且填充率为 60% 时与鸡胸肉的硬度、咀嚼性及胶粘性最接近。WILSON 等^[18]通过配比不同含量的小麦粉与鸡肉粉研究碎鸡肉的可打印性, 并调整打印工艺参数, 包括喷嘴高度、喷嘴直径、打印速度、挤出速率、电机转速及挤出压力, 结果表明在优化的打印工艺参数下具备更高的打印精度及准确度。KO 等^[19]使用同轴喷嘴辅助 3D 打印方式, 用大豆蛋白糊 (SPP) 包裹纤维溶液 (FS) 进行 3D 打印, 并对植物蛋白肉样品进行了后处理和品质纹理相关分析, 验证了同轴喷嘴辅助打印纤维组织模仿传统肉类方式的可行性。但目前针对植物蛋白肉 3D 打印的研究主要基于传统 3D 打印技术, 改变材料配方、调整工艺参数及喷头结构等方式提升样品品质, 未发现在植物蛋白肉 3D 打印过程中引入超声振动场以提升其品质。在植物蛋白方面, 超声振动已被广泛研究并证明在蛋白质变性、凝胶化、乳化等过程中具有显著作用^[20-22]。超声振动能够通过机械效应和空化效应, 促进蛋白质分子的解构与重组, 从而增强其

收稿日期: 2024-07-17 修订日期: 2024-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51875480); 香港理工大学杰出博士后计划 (P0039216); 重庆市研究生科研创新项目 (CYS23208)

作者简介: 葛志优, 研究方向为超声振动打印。

Email: gezhiyou19@163.com

*通信作者: 蔡维, 博士, 副教授, 研究方向为植物肉制造技术、绿色智能制造。Email: weicai@swu.edu.cn

凝胶化能力,提高植物蛋白的溶解性、乳化性和持水性,这对于改善其质构和加工性能至关重要。此外超声振动有利于高黏度流体材料打印及减少因喷头孔径小或者材料黏度高导致的堵塞^[23-24]。

因此,本文通过研究超声振动对植物蛋白的作用机理,数值模拟超声振动 3D 打印喷头中植物蛋白肉原材料物理场变化情况,以及试验验证超声振动 3D 打印方式对植物蛋白肉品质的影响,以提升 3D 打印植物蛋白肉的品质,为植物蛋白肉 3D 打印技术与生产提供参考。

1 超声振动 3D 打印方法

1.1 超声振动作用机理

超声波是一种超过 20 kHz 的机械波,在介质中传播时会与介质相互作用而发生相应的物理和化学变化,并且其正负交替的压力波会形成高剪切和冲击压力^[25]。高压可以调节植物蛋白的功能特性,且对豆科植物蛋白感官、物理和营养特性的影响很小^[26]。在高压条件下,产生的压力超过液体分子吸引力会导致分子中的气体被抽离形成空穴,空穴在压力作用下快速压缩破碎致使分子结构改变^[27-30]。液体进入空穴产生局部震荡,发生空化效应,并产生相应的物理化学反应,在该效应作用下, α -螺旋及 β -转角被破坏,植物蛋白分子肽链展开在保留蛋白质一级结构(氨基酸序列)的同时,改变了其二级、三级结构,促使肽链之间重新交联^[31]。

植物蛋白凝胶化是蛋白质分子间通过非共价键(氢键、疏水、离子键等)相互作用,构建稳定三维网络结构的物理交联过程,该过程伴随着蛋白质分子的聚集,使蛋白质分子间的相互作用发生变化,并会对最终凝胶的机械性能及质构特性产生影响^[32-33]。超声振动产生的空化效应会使蛋白分子聚集体减少,促进蛋白分子间的相互作用及 β -折叠展开,使得平行或反平行的 β -折叠间的氢键暴露,更易形成植物蛋白凝胶之间的连接结构^[34];同时,超声振动处理后的植物蛋白疏水基及游离巯基增加,更易形成二硫键,成型的植物蛋白凝胶网络结构更稳定^[34],如图 1 所示。因此,超声振动对植物蛋白凝胶化与 3D 打印植物蛋白肉品质稳定性具有重要作用。

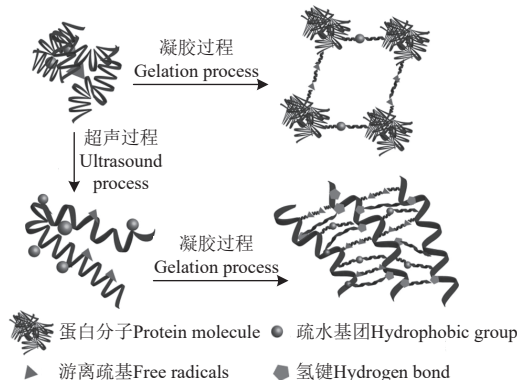


图 1 超声振动处理对植物蛋白凝胶化过程作用机理^[35]

Fig.1 Action mechanism of ultrasonic vibration treatment on the gelation process of plant proteins^[35]

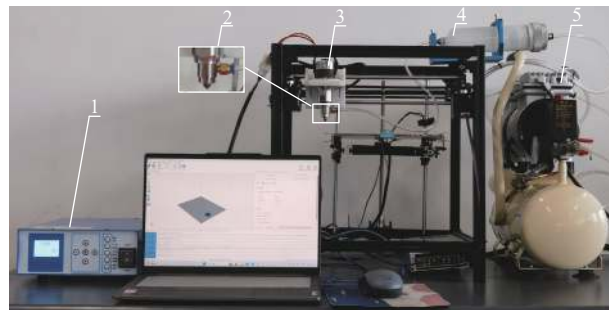
1.2 超声振动 3D 打印工艺

本研究的超声振动系统主要由超声波发生器和换能器组成。首先通过超声波发生器产生指定频率的信号传输至换能器,然后换能器利用逆压电效应,将电能转化为高频振动,并传输至与换能器,换能器与相关器件连接,带动其产生高频振动,最终作用于植物蛋白等研究对象^[36]。

本研究设计的植物蛋白肉超声振动 3D 打印工艺在传统单喷头 3D 打印工艺的基础上引入超声振动,基于超声振动的空化效应对植物蛋白凝胶化作用机理,提升植物蛋白肉品质。本装置中超声过程采用的振动频率为 28 kHz,振幅为 20 μm ,供料气压为 0.2 MPa,打印速度为 10 mm/s,打印高度为 1.0 mm。

1.3 超声振动 3D 打印装置

本研究设计的植物蛋白肉超声振动 3D 打印装置包括超声波发生器、超声振动喷头(超声波换能器、料筒及喷嘴组成),供料装置及空气压缩机等,如图 2 所示。空气压缩机通过产生设定的气压 0.2 MPa,推动供料装置中植物蛋白肉的连续供应,并输送至打印喷头。超声波发生器通过检测打印装置的固有频率,产生响应频率的电信号传输至超声波换能器压电陶瓷片,压电陶瓷片在逆压电效应下将电能转化为应变,带动打印喷头进行微量移动。在正弦电信号的作用下,喷头产生周期变化的微量位移,以产生振动辅助植物蛋白肉 3D 打印过程。



1. 超声波发生器 2. 料筒与喷嘴 3. 超声波换能器 4. 供料装置 5. 空气压缩机
1. Ultrasonic generator 2. Cylinder and nozzle 3. Ultrasonic transducer 4. Material supply unit 5. Air compressor

图 2 植物蛋白肉超声振动 3D 打印装置图

Fig.2 Diagram of ultrasonic vibration assisted 3D printing device for plant protein-based meat

2 数值分析

本文数值模拟过程在 COMSOL Multiphysics 软件中接入计算流体力学模块,并加入动网格以模拟超声振动过程,计算植物蛋白肉超声振动 3D 打印过程物料筒内与常规打印过程的速度、剪切速率及压力的变化对比。

2.1 模型构建

本研究为简化后续计算过程,该物理模型聚焦于流体部分的模拟,如图 3 所示。同时,为保证数值模拟结果的可靠性,常规 3D 打印过程(无超声振动)与超声振动 3D 打印过程采用同一个物理模型进行计算。

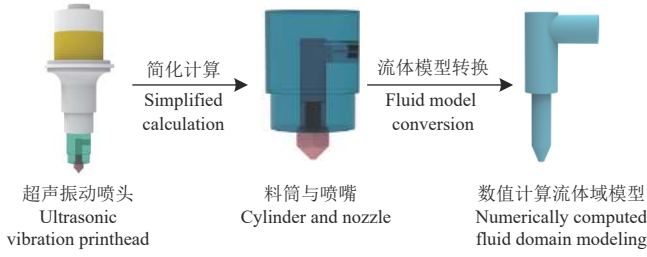


图 3 物理模型构建过程
Fig.3 Physical model building process

2.2 流变测试

本文采用半径为 25 mm 的平行板在 1 mm 间隙下，针对植物蛋白肉的流变学特性，通过流变仪（MCR 302, Anton Paar, Graz, Austria）进行试验表征。

2.2.1 旋转测试

将植物蛋白材料装载于平行板之间，下压平行板，并使用刮刀刮除边缘多余材料，减少试验误差。在 25 °C 室温下，设置剪切速率在 0.01~100 s⁻¹ 范围内，以 10^x 递增进行测试^[37]，以得到剪切速率影响下的表观黏度 (η_a) 变化。

2.2.2 测试结果

植物蛋白肉材料表观黏度 (η_a) 变化如图 4 所示。随着剪切速率的增加，植物蛋白肉材料的表观黏度 (η_a) 逐渐降低，表明该材料表现出剪切稀化行为。该材料在喷头挤出时的高剪切速率下更容易挤出，沉积到平台上后表现出较高的表观黏度，因此，使用该材料进行 3D 打印时能够更好的维持打印形状。

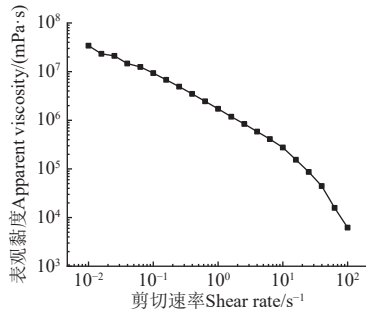


图 4 植物蛋白肉旋转测试图

Fig.4 Diagram of rotational testing of plant protein-based meat

2.2.3 黏度模型拟合

本研究采用 Carreau-Yasuda 模型对流变测试结果进行拟合^[38]，拟合采用 Origin 2021 软件进行，Carreau-Yasuda 模型如下所示：

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\dot{\gamma}\lambda)^a]^{\frac{n-1}{a}} \quad (1)$$

式中 η 为剪切黏度，Pa·s； η_0 为零剪切黏度，Pa·s； η_{∞} 为无限剪切黏度，Pa·s； $\dot{\gamma}$ 为剪切速率，s⁻¹； λ 为时间常数，s； n 为幂律指数； a 为 Yasuda 指数， $a=2$ 时为 Carreau 模型。

Carreau-Yasuda 模型拟合的具体参数如表 1 所示。植物蛋白肉材料 $R^2=0.993$ ，表明 Carreau-Yasuda 模型能够准确表示植物蛋白肉剪切黏度与剪切速率之间的关系。同时， $n=0.396$ 也表明此植物蛋白肉材料表现出剪切变稀行为，且值越接近 0 表明剪切稀化特性越明显，符合此前分析的 3D 打印特性。并将此模型拟合参数作为后

续数值模拟黏度条件开展仿真分析。

表 1 Carreau-Yasuda 模型拟合参数
Table 1 Carreau-Yasuda model fitting parameters

	η_0 /(Pa·s)	η_{∞} /(Pa·s)	λ/s	n	a	R^2
植物蛋白肉 Plant protein-based meat	0	83 345.155	423.412	0.396	1.446	0.993

2.3 初始边界条件与控制方程

本节采用的环境条件及压力条件为 25 °C 及 1 atm 恒定。为保证数值计算过程的准确性，假设植物蛋白材料不可压缩、螺杆表面无滑移，且计算过程中忽略惯性力和重力的影响。设定喷头入口处压力为 2×10^5 Pa、喷头打印出口的速度为 0.006 m/s，输入已测试得到的植物蛋白肉密度及 Carreau-Yasuda 动力黏度模型。针对施加的超声振动，设置超声振动输出时步为 (0, 4.46×10^{-6} s, 5×10^{-3} s)，振动方向为 z 轴方向。基于以上初始边界条件，通过指定变形，设定超声振动位移如式 (2) 所示。

$$A = A_0 \sin(2\pi f t) \quad (2)$$

式中 A 为超声振动位移， μm ； A_0 为振幅 ($A_0=20$)， μm ； f 为振动频率 ($f=28$)，kHz； t 为时间，s。

其连续性方程为：

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3)$$

式中 ρ 为密度，kg/m³； \mathbf{u} 为速度矢量，m/s。

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \nabla u) + F_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \nabla v) + F_y \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \nabla w) + F_z \quad (6)$$

式中 ρ 为密度，kg/m³； u 、 v 、 w 为速度 \mathbf{u} 在 x 、 y 、 z 方向上的速度分量，m/s； P 为植物蛋白基材料微流体元的压力，Pa； μ 为动力黏度，Pa·s； F_x 、 F_y 、 F_z 为微流体元分别在 x 、 y 、 z 方向上的力，N。

由于超声振动过程为周期连续变换过程，本文分析时选取振幅最大值与最小值点以反映数值模拟的极值状态和梯度变化。选择单个正弦周期内 5 个位置 ($t=0$ 、 $\pi/2$ 、 π 、 $3\pi/2$ 、 2π)，每个位置对应超声振动位移绝对值最大或者最小处（向下运动位移为正，向上运动位移为负），即对应超声振动数值模拟过程中的时刻 ($t=0$ 、 8.92×10^{-6} 、 1.78×10^{-5} 、 2.67×10^{-5} 、 3.57×10^{-5} s)，分别使用 a 、 b 、 c 、 d 、 e 5 个点表示，如图 5 所示。

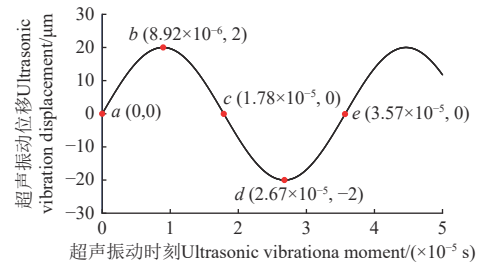


图 5 超声振动单个周期位移曲线图

Fig.5 Ultrasonic vibration single cycle displacement graph

2.4 网格划分

COMSOL Multiphysics 软件将域离散化为四面体, 六面体, 棱柱或金字塔形网格单元, 四面体网格贴体性高, 可用于自适应网格细化的单元类型, 因此本节将流体三维模型划分为四面体网格, 共划分为 105 468 个网格数。此仿真过程通过在拥有 AMD Ryzen 7 7840HS CPU @3.8 GHz, 32.00 GB RAM 和微软 Windows 11 的 64 位系统的 PC 上开展。基于此计算机条件, 分别通过 125 s 和 312 s 求解出无超声振动打印过程及超声振动打印过程的瞬态解。

2.5 结果与分析

基于上述数值模拟过程, 得到无超声振动 3D 打印与加超声振动 3D 打印的速度场、剪切速率场及压力场分布。针对超声振动 3D 打印物理场, 将通过一个周期内 5 个时刻 (即 a , b , c , d , e 5 个位置) 进行讨论, 分析增加超声振动对 3D 打印过程中植物蛋白凝胶化过程的影响规律。

2.5.1 速度场分析

无超声振动的 3D 打印流体仿真如图 6a 所示。由于边界无滑移条件, 在流体与喷头接触边界速度为 0, 其切面速度分布中从入口至喷嘴前速度均保持在 2×10^{-3} m/s 以下。当流体到达喷嘴处速度逐渐升高, 其出口表面速度达到 6.5×10^{-3} m/s, 切面速度升至 7.9×10^{-3} m/s。因此, 在无超声振动时, 喷头内部速度处于较低值。

超声振动 3D 打印流体仿真。由于边界无滑移条件, 流体与喷头接触边界速度均为超声振动时的整体喷头的振动速度。因超声振动采用正弦函数位移输入, 本文截取了一个振动周期中的 5 个位置进行分析。在 a 时刻 (图 6b), 超声振动作用下, 打印喷头整体呈现出向下运动趋势, 导致流体速度与超声振动速度叠加, 物料与打印喷嘴接触部分整体速度均保持在 2.5 m/s 以上, 直至靠近喷嘴处急剧下降, 保证了出料速度。在 b 时刻 (图 6c), 喷头整体运动至最低位置, 物料与料筒边缘接触部分速度骤降趋近于 0, 料筒内部物料速度均处于较低值, 直至靠近喷嘴表面速度才缓慢上升至 6.5×10^{-3} m/s, 切面速度提高至 8.12×10^{-3} m/s。在 c 时刻 (图 6d), 打印喷头回到中间位置, 相较于初始时刻, 具有运动速度。因此, 其料筒及喷嘴部分速度分布较初始时刻更高, 物料与料筒接触部分速度均保持在 3.2 m/s 以上, 切面速度最高达到 3.5 m/s。在 d 时刻 (图 6e), 打印喷头运动至最高位置, 其内部速度场分布与最低位置相似, 物料表面速度均趋近于 0, 喷嘴处切面速度达到最高值 8.14×10^{-3} m/s。在 e 时刻 (图 6f), 打印喷头回到中间位置, 其内部速度分布与 c 时刻相同, 但速度方向相反。

因此, 在超声振动的一个周期内, 喷头内部流体速度经历由大到小再到大的循环变化, 可能导致内部流体位置不断变化, 甚至出现湍流, 加剧了之间及植物蛋白分子的混合均匀程度。

2.5.2 剪切速率场

无超声振动 3D 打印的剪切速率数值模拟计算如图 7a

所示。流体域表面料筒剪切速率均处于 20 s^{-1} 以下的较低值, 在靠近喷嘴处, 剪切速率达到最高值 186 s^{-1} 其切面剪切速率与表面剪切速率场分布相似, 均处于较低值。

超声振动 3D 打印的剪切速率场随超声振动过程发生巨大变化, 本节将截取一个周期内的 5 个位置以说明其剪切速率场变化过程。在 a 时刻 (图 7b), 超声振动作用下, 流体域上半部料筒表面剪切速率均保持在 200 s^{-1} 附近, 在物料从入口流到与上半料筒处及上半料筒与下半料筒接触的棱角位置剪切速率处于较低值, 但在下半部料筒表面剪切速率最高能达到 1000 s^{-1} 以上, 直到喷嘴附近时, 流体剪切速率更急剧上升, 达到 $1.98 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。流体域切面剪切速率分布与表面分布规律相似, 但略低于表面剪切速率。在 b 时刻 (图 7c), 喷头处于最低位置, 此时超声振动速度趋近于 0, 致使流体域剪切速率急剧下降, 但其最高剪切速率仍能达到 356 s^{-1} 高于未施加超声振动时的剪切速率 186 s^{-1} , 且整体剪切速率分布规律不变。在 c 时刻 (图 7d), 打印喷头在超声振动作用下, 回到初始位置, 流体表面及切面剪切速率均保持与初始时刻相似, 最高剪切速率达到 $1.97 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$ 。在 d 时刻 (图 7e), 打印喷头处于最高位置, 随着超声振动速率急剧下降至 0, 其内部流体剪切速率也急剧下降, 与 b 时刻剪切速率分布规律相似。在 e 时刻 (图 7f), 打印喷头回到初始位置, 其内部流体剪切速率分布仍保持与初始时刻相似。

因此, 在超声振动的一个周期内, 打印喷头内部流体剪切速率由大减小再变大反复变换, 但其表面及切面的剪切速率均处于较高值, 为流体打印过程提供了较大的剪切速率。超声振动 3D 打印过程剪切速率分布均高于无超声振动 3D 打印过程。因此, 在超声振动作用下的 3D 打印过程将为油墨材料提供较高的剪切速率条件, 使植物蛋白肉在打印过程中具备更好的流动性, 并为超声振动下植物蛋白产生空化效应及分子解聚提供高剪切条件基础。

2.5.3 压力场

无超声振动 3D 打印流体压力场分布如图 8a 所示。此处数值模拟结果的压力值均为在标准大气压 (101 kPa) 下的相对压力。打印喷头流体从入口处向出口处逐渐增加, 在喷嘴出口处到达最高值 $6.94 \times 10^7 \text{ Pa}$, 远高于植物蛋白肉的屈服点应力 (198.93 Pa) 及流动点应力 (1478.78 Pa)。打印喷头切面处的压力分布规律与表面分布相似, 其压力值也近似与表面压力相等。

超声振动 3D 打印流体压力场分布。由于超声振动作用, 本节也将截取其中一个周期变化的 5 个位置进行压力分析。在 a 时刻 (图 8b), 料筒内部油墨压力均达到 $1.0 \times 10^9 \text{ Pa}$ 以上, 在入口边缘和出口处的压力值均处于 $2.0 \times 10^8 \text{ Pa}$ 以上, 其切面压力分布与表面分布规律类似, 且压力数值相对接近, 致使喷头内部物料压力均高于无超声振动时的压力。在 b 时刻 (图 8c), 在超声振动作用下喷头处于最低位置, 此时由于惯性, 致使下部料筒与物料接触部分的压力处于较高值 ($2 \times 10^6 \text{ Pa}$ 以

上), 而物料筒内部物料压力均保持在 10^5 Pa 以上, 切面压力值分布规律与表面压力分布相似。

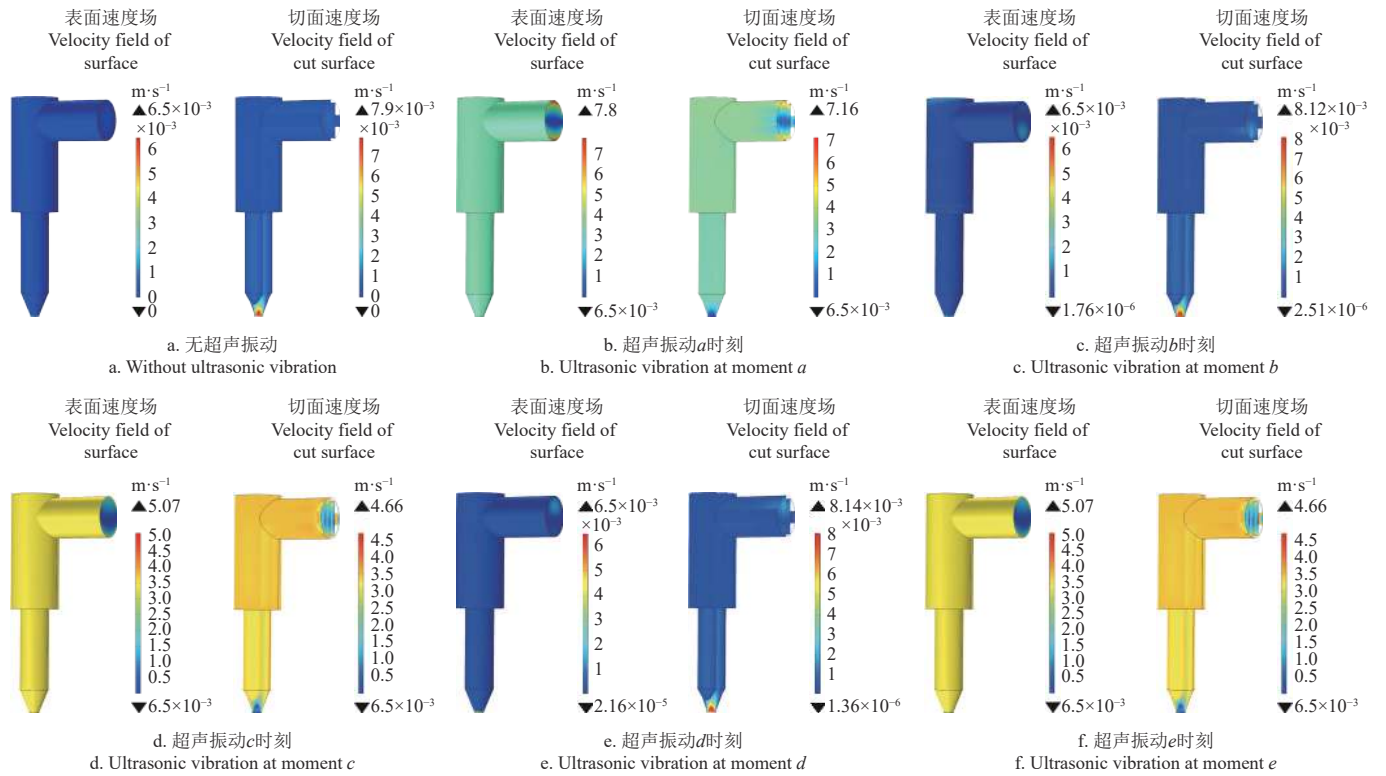


图 6 无超声振动与超声振动下 3D 打印油墨速度场分布

Fig.6 Velocity field distribution of 3D printing ink without ultrasonic vibration and with ultrasonic vibration

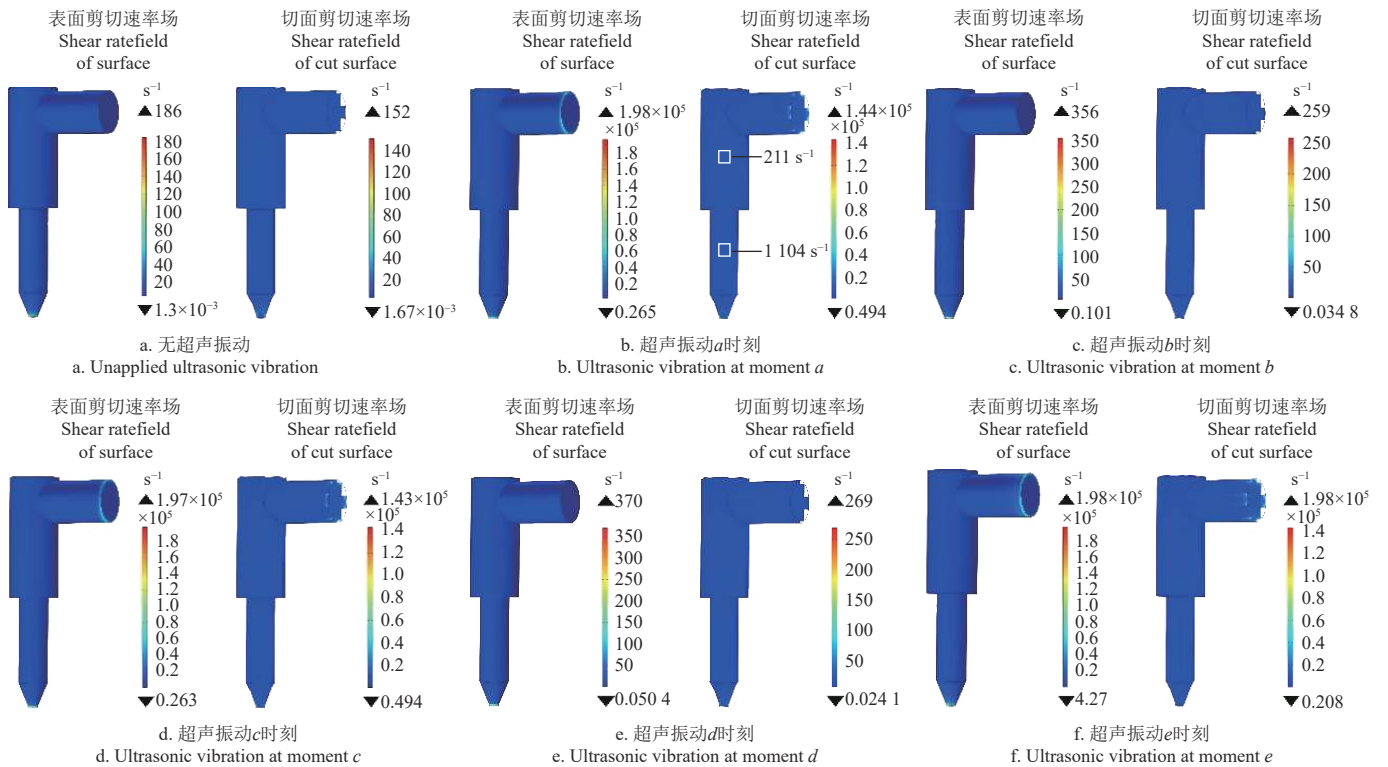


图 7 无超声振动与超声振动下 3D 打印油墨剪切速率场分布

Fig.7 Shear rate field distribution of 3D printing ink without ultrasonic vibration and with ultrasonic vibration

在 c 时刻 (图 8 d), 打印喷头回到初始位置, 流体表面及切面压力值均保持与初始时刻相似, 物料表面压力与切面压力均达到 2×10^8 Pa 以上, 但最高压力与最低

压力均低于初始时刻。在 d 时刻 (图 8 e), 打印喷头处于超声振动行程最高位置, 随着超声振动速度急剧下降至 0, 料筒内部物料压力值也急剧降低, 且料筒内下半

部分物料压力整体仍高于上半部分。在 e 时刻 (图 8f), 打印喷头再次回到初始位置, 料筒内部物料压力分布与初始时刻相似, 但表面压力低于初始时刻, 主要由于初

始时刻超声振动速度为 0, 但 e 时刻存在超声振动速度, 其加速度瞬时减小为 0, 速度达到最大值, 惯性作用下, 使向下压力值减小。

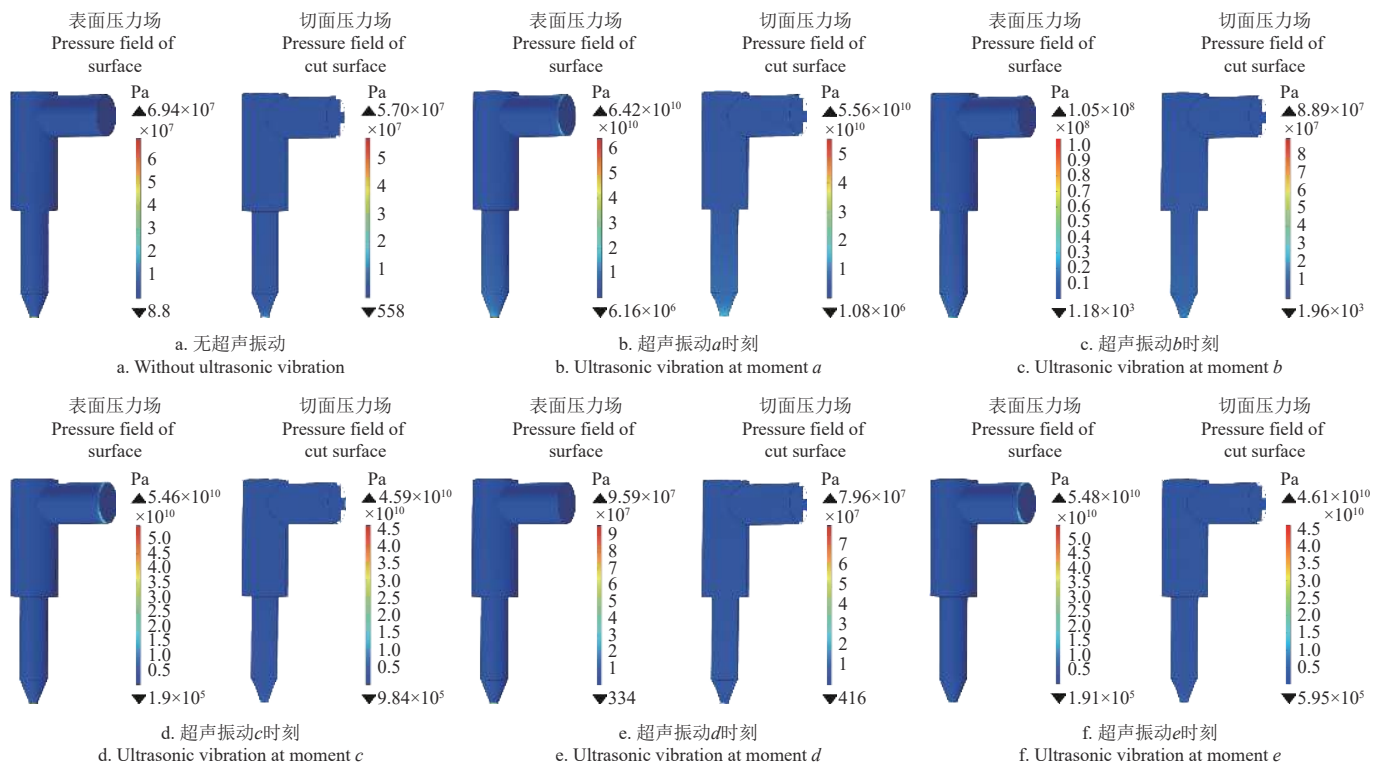


图 8 无超声振动与超声振动下 3D 打印油墨压力场分布

Fig.8 Pressure field distribution of 3D printing ink without ultrasonic vibration and with ultrasonic vibration

基于上述一个周期 5 个位置的变化过程, 打印喷头内部物料压力经历了由大变小再变大的过程, 并在超声振动过程中重复变换, 但其压力值均处于较高水平, 且最低时刻压力值仍高于无超声振动时物料压力值。因此, 该超声振动打印过程经历了压力的变化, 有利于空化效应的产生, 为植物蛋白分子解聚过程变化提供压力条件。

3 3D 打印试验

3.1 材料与方法

3.1.1 样品制备

基于已开发的植物蛋白肉制备方式进行改进^[39], 首先将谷朊粉 (封丘县华丰粉业有限公司, 河南, 中国)、大豆蛋白粉 (安阳得天力食品有限责任公司, 中国) 和大豆分离蛋白 (临沂山松生物制品有限公司, 中国) 溶于水。然后加入少量黄原胶 (山东阜丰发酵有限公司) 作为黏合剂。在行星搅拌器 (广东钻厨电器有限公司, 中国) 中以 2 000 rpm/min 的转速搅拌均匀搅拌油墨 30 min。然后加入马铃薯淀粉 (静宁红光淀粉有限公司)、菜籽油 (市场购买)、盐 (市场购买)、甲基纤维素 (上申光食用化学品有限公司) 和酵母提取物 (安琪酵母股份有限公司)。然后加入少量着色剂 (珠海锦田天然色素有限公司) 和风味剂调节颜色和风味。再加入氯化钙 (江苏科伦多食品配料有限公司) 作为固化剂。

最终的油墨溶液含有 13% 谷朊粉, 57% 水, 2% 大豆蛋白粉, 2% 大豆分离蛋白, 2.4% 黄原胶, 13% 马铃薯淀粉, 3% 菜籽油, 3% 甲基纤维素, 0.6% 着色剂, 1.3% 酵母提取物, 1.5% 风味剂, 1% 盐和 0.2% 氯化钙, 其中除去水和盐, 非植物性添加成分为 9% 小于标准中 10% 的标准要求^[40]。在行星搅拌器中以 2 000 rpm/min 的转速搅拌均匀搅拌油墨 3 min。

3.1.2 试验方法

针对常规气压式 3D 打印过程, 将配置的油墨材料加入 100 mL 供料装置内, 完成气路连接, 打开空气压缩机, 调节气压, 以保证油墨材料的顺利供料和挤出, 最后按照指定设计模型进行打印成型。针对超声振动 3D 打印过程, 将配置的植物蛋白肉油墨加入 100 mL 供料装置内, 盖上气压顶盖, 调节气压泵气压至 0.5 MPa (由于供料装置内内部物料的体积变化导致阻力变化, 因此随即调整气压大小保证打印效果), 保证油墨在气压作用下稳定挤出。无超声振动与超声振动 3D 打印过程工艺参数设置相同, 打印速度为 50 mm/s、喷嘴高度为 1.0 mm、喷嘴流量为 80 mm³/s。同时, 打开超声波发生器, 调节振动参数, 使喷头能够稳定振动。最后, 启动已切片的 G-code 文件, 直至模型打印成型。在对打印完成两类样品分别进行标记后, 将所有样品放在 100 °C 蒸锅中蒸 5 min 后取出, 并在 170 °C 平底锅中双面各煎 20 s。待样品冷却到室温后进行质构测定。

3.1.3 质构测试

本文质构测试采用 TMS-PRO 质构仪（美国 Food Technology Corporation 公司）。首先，装配量程 250 N 的感应元件，432-010 型号探头，选定 TPA -250 N 测试程序，进行仪器回零，并设定起始力为 0.375 N，上升高度 20 mm，两次下压间隔时间 3 s，压缩变形量为 40%，测试速度为 40 mm/s。然后，将待测样品放置于测试平台上，以测试硬度、弹性和咀嚼性^[41]。

3.2 结果与讨论

基于上述数值模拟结果，开展了试验测试，无超声振动 3D 打印样品与超声振动 3D 打印样品如图 9 所示，外观上通过肉眼难以区分两组打印样品的品质差异，通过质构仪对两组植物蛋白肉品进行硬度、弹性、咀嚼性测试，质构测试结果如图 10 所示。

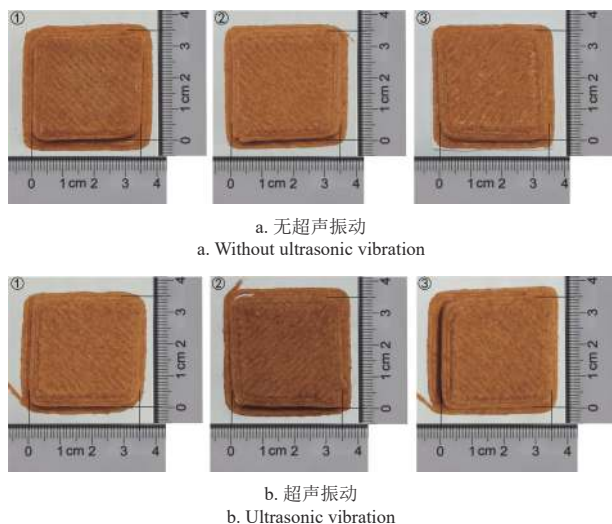


图 9 无超声振动 3D 打印与超声振动 3D 打印样品
Fig.9 3D printed samples without ultrasonic vibration and with ultrasonic vibration

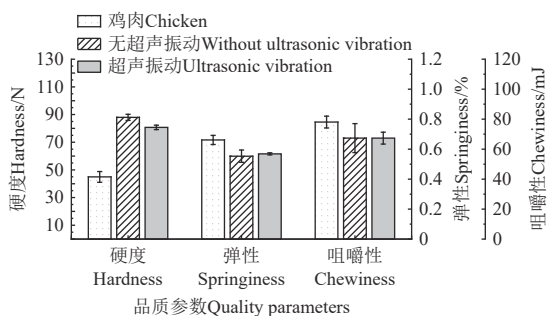


图 10 无超声振动 3D 打印样品与超声振动 3D 打印样品品质参数

Fig.10 Quality parameters of 3D printed samples without ultrasonic vibration and with ultrasonic vibration

通过 3 组样品测试，计算硬度、弹性、咀嚼性的平均值与标准差，其中超声振动 3D 打印样品的硬度、弹性、咀嚼性值分别为 (80.73 ± 1.59) N， (56.86 ± 0.69) %， (67.35 ± 3.94) mJ，无超声振动 3D 打印样品的硬度、弹性、咀嚼性值分别为 (87.97 ± 2.20) N， (55.31 ± 4.09) %， (67.37 ± 9.67) mJ，如图 10 所示。结果表明，超声振动

3D 打印产品相较于常规 3D 打印产品，其硬度下降，弹性和咀嚼性较为接近，硬度、弹性、咀嚼性标准差值均低于无超声振动 3D 打印样品，即超声振动 3D 打印样品品质参数波动程度低于无超声振动 3D 打印样品，超声振动 3D 打印样品的硬度、弹性、咀嚼性等品质更加稳定，其中稳定性提升百分比可通过式 (7) 计算。

$$q = \frac{B-C}{B} \times 100\% \quad (7)$$

式中 q 为品质参数稳定性提升百分比， B 为无超声振动 3D 打印样品品质参数标准差， C 为超声振动 3D 打印样品品质参数标准差。

相较于无超声振动 3D 打印样品，超声振动 3D 打印样品硬度稳定性提升 27.75%，且硬度有所下降，弹性稳定性提升 83.14%，咀嚼性稳定性提升 59.30%。其原因可能是在高压与高剪切作用下减小了植物蛋白颗粒大小，并在超声振动速度场变化作用下使其分布更加均匀，减小了局部植物蛋白颗粒聚集带来的品质不稳定性，超声振动样品在品质参数上表现的更加稳定，试验表明超声振动 3D 打印方法将有助于打印出品质参数更加稳定的植物蛋白肉。

4 结 论

该研究基于超声振动对植物蛋白凝胶过程的作用机理，开发了超声振动 3D 打印装置，将超声振动技术应用于植物蛋白肉 3D 打印工艺过程，提高植物蛋白肉 3D 打印产品品质，并通过仿真分析及试验验证，得到的结论如下：

1) 通过数值模拟计算了超声振动和无超声振动下喷头内部流体域的速度场、剪切速率场、压力场变化情况。结果表明，在超声振动作用下，打印喷头内部流体速度经历了由大到小再到大的循环变化，为植物蛋白分子的均匀混合提供了条件；打印喷头内部流体剪切速率由大减小再变大反复变换，且其表面及切面的剪切速率均处于较高值，为流体打印过程提供了较大的剪切速率；打印喷头内部物料压力经历了由大变小的过程，并在超声振动过程中重复变换，其压力值均处于较高水平，且最低时刻压力值仍高于无超声振动时物料压力值，为植物蛋白分子解聚过程变化提供了压力条件。因此超声振动不仅提高了植物蛋白肉的可打印性，并且有利于促进植物蛋白凝胶化。

2) 开发了植物蛋白肉超声振动 3D 打印装置，增加了气压式 3D 打印装置面向植物蛋白肉的可打印性，实现了超声预处理方式与植物蛋白肉加工工艺的整合，提高了植物蛋白肉成型效率。

3) 通过对比试验，探究了超声振动对植物蛋白肉 3D 打印产品品质的影响。结果表明，超声振动 3D 打印样品硬度、弹性、咀嚼性标准差值均低于无超声振动 3D 打印样品，即超声振动 3D 打印样品品质参数波动程度低于无超声振动 3D 打印样品，超声振动 3D 打印的植物蛋白肉相较于无超声振动打印的植物蛋白肉的硬度、弹性、

咀嚼性的品质稳定性分别提升 27.75%, 83.14%, 59.30%。

综上所述, 超声振动技术与植物蛋白肉 3D 打印过程相结合提高了植物蛋白肉的可打印性和打印产品品质。本研究提出了超声振动技术与植物蛋白肉 3D 打印相结合的植物蛋白肉超声振动 3D 打印方法, 为其他场辅助 3D 打印改善植物蛋白肉品质的研究及其在食品工业中应用提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] GODFRAY H C J, AVEYARD P, GARNETT T, et al. Meat consumption, health, and the environment[J]. *Science*, 2018, 361(6399): eaam5324.
- [2] OECD-FAO . OECD-FAO Agricultural Outlook 2016-2025[R]. Paris , OECD , 2016:107-109.
- [3] SCARBOROUGH P, CLARK M, COBIAC L, et al. Vegans, vegetarians, fish-eaters and meat-eaters in the UK show discrepant environmental impacts[J]. *Nature Food*, 2023, 4(7): 565-74.
- [4] OFFICE OF ASSISTANT DIRECTOR-GENERAL (NATURAL RESOURCES MANAGEMENT AND ENVIRONMENT DEPARTMENT) . Livestock and Landscapes[R]. Geneva:Food and Agriculture Organization of the United Nations , 2013:1-4.
- [5] MANCINI M C, ANTONIOLI F. Exploring consumers' attitude towards cultured meat in Italy[J]. *Meat Science*, 2019, 150: 101-110.
- [6] WANG Y, CAI W, LI L, et al. Recent advances in the processing and manufacturing of plant-based meat[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2023, 71(3): 1276-1290.
- [7] 张智霞, 马鑫淼, 许慧, 等. 人造肉技术的研究现状及展望[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(17): 416-425.
ZHANG Zhixia, MA Xinmiao, XU Hui, et al. Research status and prospects of artificial meat technology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(17): 416-425. (in Chinese with English abstract)
- [8] 曾艳, 郝学财, 董婷, 等. 植物蛋白肉的原料开发、加工工艺与质构营养特性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(3): 338-345, 350.
ZENG Yan, HAO Xuecai, DONG Ting, et al. Research progress on raw material development, processing technology and nutritional properties of plant based meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(3): 338-345,350. (in Chinese with English abstract)
- [9] 芦鑫, 路风银, 孙强, 等. 植物蛋白肉感官品质与营养安全研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2024, 37(6): 6-10.
LU Xin, LU Fengyin, SUN Qiang, et al. Research progress on the quality of sensory, nutrition and safety of plant protein meat[J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(6): 6-10. (in Chinese with English abstract)
- [10] DEKKERS B L, BOOM R M, VAN Der Goot A J. Structuring processes for meat analogues[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 81: 25-36.
- [11] 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.
YANG Genghan, HUANG Mingyuan, XU Xinglian. Food 3D printing technology and its application in meat processing: A review[J]. *Food Science*, 2021, 42(21): 308-314. (in Chinese with English abstract)
- [12] WU L, DONG Z C. Interfacial regulation for 3D printing based on slice - based photopolymerization[J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(29): 2300903.
- [13] SHAHBAZI M, JAGER H, ETTELAIE R. A promising therapeutic soy-based pickering emulsion gel stabilized by a multifunctional microcrystalline cellulose: Application in 3D food printing[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70(7): 2374-2388.
- [14] 王红磊, 厉佳怡, 郭婷婷, 等. 豌豆蛋白基 3D 打印植物肉体系的构建及其打印品质影响机制[J]. *食品科学*, 2024, 45(13): 26-37.
WANG Honglei, LI Jiayi, GUO Tingting, et al. Construction of pea protein-based 3D printing plant-based meat analogs system and exploration of its printing quality[J]. *Food Science*, 2024, 45(13): 26-37. (in Chinese with English abstract)
- [15] 朱益源, 徐恩波, 程焕, 等. 基于高精度 3D 打印的三文鱼植物基替代物研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(11): 111-120.
ZHU Yiyuan, XU Enbo, CHEN Huan, et al. Study on plant-based salmon substitutes based on high precision 3D printing[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(11): 111-120. (in Chinese with English abstract)
- [16] LIU Y W, YU Y, LIU C S, et al. Rheological and mechanical behavior of milk protein composite gel for extrusion-based 3D food printing[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 102: 338-346.
- [17] CHEN Y Y, ZHANG M, BHANDARI B. 3D printing of steak-like foods based on textured soybean protein[J]. *Foods*, 2021, 10(9): 2011.
- [18] WILSON A, ANUKIRUTHIKA T, MOSES J A, et al. Customized shapes for chicken meat-based products: Feasibility study on 3d-printed nuggets[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(11): 1968-1983.
- [19] KO H J, WEN Y X, CHOI J H, et al. Meat analog production through artificial muscle fiber insertion using coaxial nozzle-assisted three-dimensional food printing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106898.
- [20] JOSEPHINE A, MICHAEL N. Ultrasound-assisted processing: Science, technology and challenges for the plant-based protein industry [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2022, 84: 105955.
- [21] BYANJU B, RAHMAN M M, HOJILLA-EVANGELISTA P M, et al. Effect of high-power sonication pretreatment on extraction and some physicochemical properties of proteins from chickpea, kidney bean, and soybean [J]. *International*

- Journal of Biological Macromolecules, 2020, 145 (C): 712-721.
- [22] 蔡燕萍, 游寅寅, 刘建华, 等. 大豆蛋白凝胶性及其改良方法的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(15): 298-306. CAI Yanping, YOU Yinyin, LIU Jianhua, et al. Research progress on the gelation properties and modification methods of soy protein[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(15): 298-306. (in Chinese with English abstract)
- [23] 肖顺杰. 超声振动辅助高粘度流体多材料 3D 打印系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022. XIAO Shunjie. Research on Ultrasonic Vibration Assisted Multi-material 3d Printing System of High Viscosity Fluid[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [24] GUNDUZ I, MCCLAIN M, CATTANI P, et al. 3D printing of extremely viscous materials using ultrasonic vibrations [J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 98-103.
- [25] LIU W Y, LI J, CHEN Z, et al. Unveiling the “sono-physico-chemical” essence: Cavitation and vibration effects in ultrasound-assisted processes[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2024, 61: 37-53.
- [26] MULLA M Z, SUBRAMANIAN P, DAR B N. Functionalization of legume proteins using high pressure processing: Effect on technofunctional properties and digestibility of legume proteins[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 158: 113106.
- [27] 韩格, 孔保华. 功率超声对肌原纤维蛋白功能特性及肉品质影响研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 361-369. HAN Ge, KONG Baohua. Effect of power ultrasound on the functional properties of myofibrillar protein and meat quality: A review[J]. Food Science, 2022, 43(13): 361-369. (in Chinese with English abstract)
- [28] 齐冬, 王骁, 刘斌, 等. 大豆分离蛋白超声乳化作用机理[J]. 食品科学, 2023, 44(9): 32-38. QI Dong, WANG Xiao, LIU Bin, et al. Mechanistic analysis and application of ultrasonic emulsification of soy protein isolate[J]. Food Science, 2023, 44(9): 32-38. (in Chinese with English abstract)
- [29] 荆卉, 孙俊, 牟瑶瑶, 等. 超声波物化效应及其对蛋白质改性的应用研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 321-330. JING Hui, SUN Jun, MU Yaoyao, et al. Research advance in physicochemical effect of ultrasonic and its application in protein modification[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(6): 321-330. (in Chinese with English abstract)
- [30] 熊喆, 赵钰, 秦子波, 等. 超声辅助酶解促进草鱼鳞胶原蛋白水解进程的内在机制解析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(16): 313-321. XIONG Zhe, ZHAO Yu, QIN Zibo, et al. Analysis of the internal mechanism for ultrasound-assisted enzymatic hydrolysis for promoting the hydrolysis of grass carp scale collagen peptide[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(16): 313-321. (in Chinese with English abstract)
- [31] 曹佳兴, 朱海兰, 王君荣, 等. 高强度超声波浴对小麦醇溶蛋白结构及抗原性的影响[J]. 河南工业大学学报 (自然科学版), 2023, 44(2): 64-71, 112. CAO Jiaxing, ZHU Hailan, WANG Junrong, et al. Effects of high-intensity ultrasonic bath on the structure and antigenicity of gliadin[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(2): 64-71, 112. (in Chinese with English abstract)
- [32] 曲敏, 王宇, 朱秀清, 等. 谷朊粉基共混黏合体系的构建及在素肉饼中的应用[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 285-294. QU Min, WANG Yu, ZHU Xiuqing, et al. Construction of gluten based blend adhesive system and its application in vegetable meat pie[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(19): 285-294. (in Chinese with English abstract)
- [33] NICOLAI T. Gelation of food protein-protein mixtures[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2019, 270: 147-164.
- [34] TANG C H. Effect of thermal pretreatment of raw soymilk on the gel strength and microstructure of tofu induced by microbial transglutaminase[J]. LWT - Food Science and Technology, 2007, 40(8): 1403-1409.
- [35] 衣程远, 孙冰玉, 刘琳琳, 等. 超声处理对大豆蛋白结构及性质的影响研究进展[J]. 中国调味品, 2022, 47(12): 197-200. YI Chengyuan, SUN Bingyu, LIU Linlin, et al. Research progress on the effect of ultrasonic treatment on structure and properties of soybean protein[J]. China Condiment, 2022, 47(12): 197-200. (in Chinese with English abstract)
- [36] 王家胜, 王东伟, 赵智豪. 超声波振动下农机触土部件-土壤相互作用力学特性[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 35-41. WANG Jiasheng, WANG Dongwei, ZHAO Zhihao. Mechanical properties of soil-engaging components interacted with ultrasonic vibration in agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(23): 35-41. (in Chinese with English abstract)
- [37] ROMÁN - MANSO B, WEEKS R D, TRUBY R L, et al. Embedded 3D printing of Architected Ceramics via Microwave-Activated Polymerization[J]. Advanced Materials, 2023, 35(15): 2209270.
- [38] MAHMOOD R, BILAL S, KHAN I, et al. A comprehensive finite element examination of Carreau Yasuda fluid model in a lid driven cavity and channel with obstacle by way of kinetic energy and drag and lift coefficient measurements[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 1785-1800.
- [39] 蔡维, 王羽, 高艳娥, 等. 植物蛋白肉 3D 打印工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(12): 254-264. CAI Wei, WANG Yu, GAO Yan'e, et al. Optimization of the

- process parameters for 3D printing plant protein meat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(12): 254-264. (in Chinese with English abstract)
- [40] 中国食品科学技术协会. 植物基肉制品: T/CIFST 001-2020[S]. 北京: 中国食品科学技术协会, 2020.
- [41] WU D X, WANG H P, GUO X Y, et al. Insight into the mechanism of enhancing myofibrillar protein gel hardness by ultrasonic treatment combined with insoluble dietary fiber from oat[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2023, 178: 114539.

Method and experiment of the ultrasonic vibration 3D printing for plant protein-based meat

GE Zhiyou¹, WANG Yu¹, GAO Yan'e¹, CAI Wei^{1,2*}

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Department of Logistics and Maritime Studies, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: Since animal meat has been a major source of protein, conventional livestock farming is ever-increasing, as the global population grows. But the livestock farming has caused serious resource and environmental issues in recent years, such as greenhouse gas emissions, land occupation, water consumption, and loss of biodiversity. Alternatively, plant protein meat (PPM) can be expected to serve as the animal meat analogue, in order to alleviate the shortage of animal meat, resource consumption, and environmental pollution. The primary processing techniques for PPM currently include extrusion, spinning, shearing, and 3D printing. Specifically, the emerging 3D printing has been successfully applied to PPM production in the food industry, thus enabling customization of nutritional content, shape, texture, and flavor. Previous studies of 3D-printed PPM have focused primarily on material formulations, process parameters, or nozzle structures in conventional 3D printing. Among them, ultrasonic vibration has been used to print highly viscous fluid materials in protein extraction, gelation, and food processing. Better performance has also been achieved to mitigate the clogging caused by small nozzle diameters or high material viscosity. However, it is still lacking in the application of ultrasonic vibration for the high quality of 3D-printed PPM. In this study, ultrasonic vibration was introduced to improve the quality of 3D-printed PPM. A systematic analysis was made to explore the mechanism of ultrasonic vibration on plant proteins. Rheological property tests and numerical simulations of 3D printing nozzles were then carried out to investigate the effect of ultrasonic vibration on the gelation of plant proteins. A novel ultrasonic vibration-assisted 3D printing system was developed for PPM using single-nozzle 3D printing. A series of experiments were conducted to clarify the influence of ultrasonic vibration on the quality of 3D-printed PPM. The numerical simulation results demonstrated there was a cyclic variation in the fluid velocity inside the printing nozzle, with the trend of increasing, decreasing, and then increasing for the uniform mixing of protein molecules. Additionally, the shear rate within the nozzle exhibited repetitive fluctuations with decreasing and then increasing, where relatively high shear rates were observed on both the surface and cross-sections of the fluid. A high-shear environment was provided for the stepwise depolymerization of protein molecules during printing. The internal fluid pressure within the nozzle also showed a cyclic variation in the decreasing and then increasing. The lowest pressure value was still higher than that in the absence of ultrasonic vibration. This fluctuation of pressure greatly contributed to the necessary conditions for the depolymerization of protein molecules. Thus, the ultrasonic vibration supplied the higher shear and pressure to the plant proteins during 3D printing. The gelation process was promoted to ultimately improve the molding quality of 3D-printed PPM products. Experimental results revealed that the printed products exhibited decreased hardness, comparable elasticity, and chewiness after ultrasonic vibration, compared with conventional 3D printing. In terms of the stability of hardness, elasticity, and chewiness, the fluctuations in these quality parameters were lower than those in the samples printed without ultrasonic vibration. Specifically, the stability of hardness, elasticity, and chewiness increased by 27.75%, 83.14%, and 59.30%, respectively, indicating a more consistent quality for the samples printed with ultrasonic vibration. The ultrasonic vibration was incorporated into the 3D printing of PPM for the stability of quality attributes. The finding can also provide valuable insights into producing high-quality plant-based protein meat using 3D printing.

Keywords: proteins; plant meat; 3D printing; ultrasonic vibration; numerical simulation