

淀粉类凝胶三维打印研究进展

杨帆*, 崔颖, 刘兴训, 杨文建

(南京财经大学食品科学与工程学院, 南京 210046)

摘要: 食品三维打印技术是食品加工业革命性的创新发展, 能够在未来解决我国食品加工业和食品产业面临的营养个人订制性以及生产适合老人和婴幼儿的易咀嚼食品诸多问题。淀粉是食品中最常见的组分, 其在高温发生糊化并且与其他组分交联形成的凝胶体系是很好的食品三维打印材料。本文先是阐释了挤压式食品三维打印技术的工作原理, 以及淀粉的结构及物理化学性质, 揭示了淀粉的物理化学性质与淀粉类材料三维打印形状稳定性之间的联系, 从而进一步介绍了材料特性、三维打印挤出行为及后处理方法对淀粉三维打印产品形状稳定性的影响以及兼具易咀嚼特性和个性化营养特性的三维打印产品的相关研究。

关键词: 淀粉类凝胶; 挤出式三维打印; 形状稳定性; 易咀嚼

Research progress of starch gel based on the three-dimensional printing

YANG Fan*, CUI Ying, LIU Xing-Xun, YANG Wen-Jian

(School of Food Science and Technology, Nanjing University of Finance and Economic, Nanjing 210046, China)

ABSTRACT: The three-dimensional printing technology is a revolutionary innovative development in the food processing industry, which can solve many problems such as personalized nutritional food and easy-to chew food for the children and the old men, which are faced by Chinese food processing industry and food industry in the future. The gel system forms by crosslinking the aqueous solution of starch with other components in the process of high temperature gelatinization is a good food material for three-dimensional printing. This paper first explained the working principle of the three-dimensional printing technology of extruded food, as well as the structure and physicochemical properties of starch, revealing the relationship among the physical and chemical properties of starch and the three-dimensional printing shape stability of starchy materials. The paper further introduced the influence of material properties, three-dimensional printing extrusion behavior and post-processing methods on the shape stability of starch three-dimensional printing products, as well as related research on personalized nutritional easy-to-chew three-dimensional printing products.

KEY WORDS: starch gel; three-dimensional extrusion printing; shape stability; easy-to-chew

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(19KJB550008、19KJA520001)、江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK20190795、BK20191407)

Fund: Supported by the University of Jiangsu Province Natural Science Foundation of China (19KJB550008, 19KJA520001) and Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20190795, BK20191407)

***通讯作者:** 杨帆, 讲师, 主要研究方向为食品加工及食品三维打印。E-mail: apollous@126.com

***Corresponding author:** YANG Fan, Lecturer, Nanjing University of Finance and Economic, No.3, Wenyuan Road, Qixia District, Nanjing 210023, China. E-mail: apollous@126.com

1 引言

食品三维打印技术是基于离散堆积成型的原理,通过计算机辅助设计、软件切片分层、数字控制成型及精密传动技术,利用喷嘴喷涂或挤出特殊处理进行逐层叠加粘合,最终实现复杂形状或结构的产品的数字化食品制造技术^[1]。发展基于三维打印技术的新型食品加工技术是食品加工业革命性的创新发展,能够在未来解决我国食品加工业和食品产业面临的营养个人订制性以及生产适合老人和婴幼儿的易咀嚼食品等诸多问题^[2,3]。随着经济的发展和人民生活水平的提高,我国居民的饮食习惯和饮食结构也发生了巨大的变化,人们不再仅仅满足于温饱需要,开始重视食品的营养、质量和加工工艺,越来越多的人开始追求个性品味,而三维打印技术在食品领域的应用有很多优点,如订制化食品设计、个性化和数字化营养定制等^[4,5]。使用这种技术可以生产一些普通人无法制作的形状复杂、结构特异的食品。食品三维打印技术也可以允许根据个人的身体和营养状况对个人的营养和能量需求进行数字化和个性化定制^[6,7]。然而相较于金属三维打印和塑料三维打印,食品三维打印技术主要以巧克力、面团等少量物质作为原材料,该技术发展受到相对较窄的原料范围的严重制约,发展缓慢^[8],因此开发具有较高附加值的食品三维打印材料是目前的重中之重。本文对最常见的挤压式食品三维打印技术的工作原理以及淀粉的结构及物理化学性质进行了阐释,揭示了淀粉的物理化学性质与淀粉类材料三维打印品质之间的联系,进一步介绍了材料特性、三维打印挤出行为及后处理方法对淀粉三维打印产品形状稳定性的影响,以及私人订制化的易咀嚼的且满足不同人群营养需求的三维打印产品的相关研究。

2 食品三维打印的原理

食品三维打印技术是在 2012 年起逐渐被研究人员所重视的。尽管网络媒体上关于食品三维打印的报道有很多,但是关于食品三维打印方面的基础研究、适合于三维打印用的食品材料方面的相关研究还非常的缺乏,这在一定程度上限制了食品三维打印技术的进步与应用^[9]。推动食品三维打印技术的进步,首先需要系统深入地研究食品物料的组分结构、物理化学性质和三维打印特性之间的关系,如原料的种类、化学组成、加热条件及各种添加剂。事实上,各种预处理方式和加热方式都会显著影响物料体系的特性,这些是决定三维打印成功与否的重要因素^[10-12]。此外食品三维打印技术特有的内部结构填充方式和填充比的可调节性是传统模具食品生产方法所不具备的^[13]。因此研究食品物料特性和三维打印特性之间的关系、预处理和打印工艺对三维打印效果的影响,以及借助于三维打印

技术特有的内部填充方式来生产特殊质构特性及咀嚼特性的食品具有重要意义,这将有助于推动我国食品三维打印产业可持续发展。

国内外食品三维打印研究包括康奈尔的三维打印烘焙糕点、荷兰应用科学研究组织的昆虫及藻类的三维打印产品及 Hershey 等公司的巧克力三维打印,说明物料的流变学特性、质构特性和热力学特性对于产品的形状稳定性是非常重要的,但是材料特性和三维打印挤出行为如何影响产品的三维打印形状稳定性的作用方式和机制还需要进一步研究^[14-16]。

3 淀粉多尺度结构与物理化学性质

3.1 淀粉多尺度结构

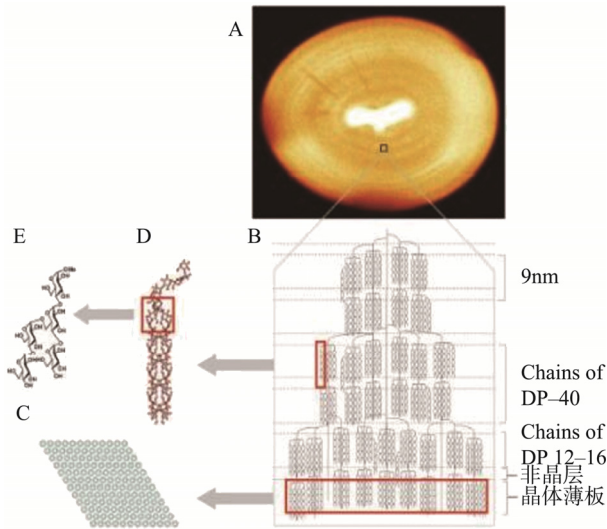
淀粉是高等植物用于储存能量的物质,其结构是为了适应自身的需求而形成的。淀粉结构比较复杂,通常从颗粒结构、聚集态结构和分子结构几个尺度进行研究^[17-19],如图 1,在颗粒结构上,淀粉通常以直径为 2~100 μm 的球形颗粒形式储存在种子中,商品化的淀粉,如玉米淀粉、大米淀粉、小麦淀粉、马铃薯淀粉和木薯淀粉等,都是从植物中分离出来的。这些淀粉在颗粒结构上有很大差异,主要是基于孔(pore)和渠(channel)的分布,直接影响了淀粉糊化的效率等^[20]。

在分子结构上,淀粉作为一种天然聚合的碳水化合物,通常由直链淀粉和支链淀粉组成。直链淀粉主要以 α -1,4 糖苷键连接形成线性结构,支链淀粉是通过 α -1,4 糖苷键连接直链, α -1,6 糖苷键连接支链的高度分支结构。直链淀粉的分子量约为 1×10^6 ,是传统合成聚合物的 10 倍左右,直链淀粉的线性结构使其性状更接近常规合成聚合物。而支链淀粉是一种支链聚合物,其分子量远大于直链淀粉,光散射测量表明其分子量以百万计^[21]。

淀粉的聚集态结构是近年来研究的热点,聚集态结构研究的内容通常包括淀粉的晶型和结晶度、淀粉的有序程度以及淀粉的片层结构等^[18]。大多数天然淀粉呈现半结晶结构,结晶度约为 20%~45%^[22]。直链淀粉和支链淀粉的分支点形成无定形区域,支链淀粉中的短支链是淀粉颗粒的主要结晶成分,以双螺旋的形式存在,长度通常在 5 nm 左右。图 2 显示了不同直链/支链比例的 4 种玉米淀粉的广角 X 射线衍射图谱。可以看出,蜡质玉米淀粉和普通玉米淀粉呈现典型的 A 型谱,而高直链玉米淀粉(G50 和 G80)呈现 B 型谱^[23]。

淀粉的有序结构主要是指淀粉中螺旋结构的分布,淀粉的螺旋结构包括单螺旋和双螺旋的分布,淀粉螺旋结构越规整,表明淀粉的有序程度越大。近年来广泛进行的淀粉有序程度的定量和定性研究,用来解释淀粉尤其是非晶淀粉的糊化和消化特性等。淀粉的层状结构是指淀粉中

包含结晶区和无定形区交替分布的重复单元,其尺寸约 9 nm,在淀粉的小角 X 光谱图上呈现一个特征峰,约在 $q=0.68 \text{ nm}^{-1}$ 处,淀粉层状结构的消失,是淀粉糊化的重要指标^[23]。



注: A: 小麦淀粉颗粒的横截面, B: 支链淀粉分层结构示意图。交替的非晶和晶片层间距为 9 nm, C: 平行螺旋填料的横截面, 形成六角形(A 型或 B 型)或伪六角形填料。交替无定形和晶体层状紫胶重复 9 nm 间距, D: 最先进的造型涉及微小的双螺旋结构和纳米晶填料, E: 化学合成的模拟淀粉和糖原分支点的支链戊糖的结构。

图 1 淀粉多尺度结构^[17]

Fig.1 The multi-scale structure of the starch^[17]

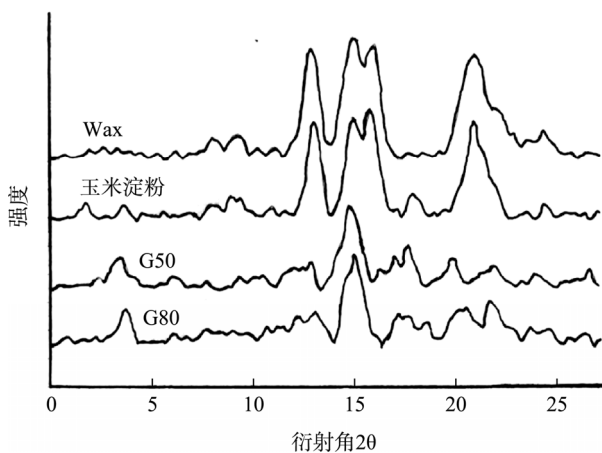


图 2 不同直链淀粉/支链淀粉含量淀粉的 X 光衍射图^[24]

Fig.2 X-ray diffraction pattern of starch with different amylose/amylopectin content^[24]

3.2 淀粉在挤出加工过程中的相变和流变学研究

食品挤压加工就是将食品物料经预处理(比如粉碎和混合等)后,置于挤压机中,通过机械作用使其强制通过一个专门设计的孔口(比如食品三维打印机的喷头),从而制

成具有一定形状和组织状态的食品产品的过程。挤出加工是淀粉基食品和材料加工中最常用的技术之一,挤出加工能够在较低水分含量下对淀粉进行剪切塑化。3D 打印机由于螺杆短,一般挤出加工前先把淀粉进行糊化处理。体系中的淀粉原料种类、水分含量、温度和剪切速率等对淀粉塑化的效果有很大的影响。因此,研究淀粉挤出过程中的相变和流变对于优化挤出工艺,改进 3D 打印设备,具有重要的指导意义。

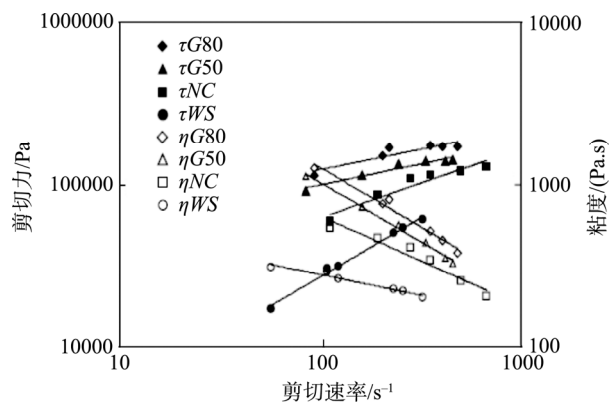
淀粉相变十分复杂,涉及多种化学和物理反应,如水分子扩散、颗粒膨胀、糊化、分解、熔融和结晶等。糊化是淀粉转化为淀粉类凝胶的基础。广义上的“糊化”是指淀粉颗粒中结晶结构的破坏,是不可逆的过程,包括颗粒膨胀、自身晶体熔化和分子变为可溶性^[24-28],最近研究表明,淀粉的片层结构在糊化过程中也会发生破坏。淀粉颗粒在挤出过程中经历独特和复杂的相变(通常是在水环境中),包括淀粉膨胀、晶体结构破坏、熔融和裂解等。挤出加工通常涉及剪切和高压实现低水分含量下的糊化。通过剪切力场破坏淀粉颗粒,使水分子快速进入淀粉内部^[29],因而在挤出过程中,淀粉结晶度的损失除了受到水渗透作用的影响以外,主要是由于挤出机内的强剪切力场导致分子键的机械破坏引起的。在低水分含量的挤出过程中,同时存在少量的糊化和融化的淀粉以及淀粉碎片(降解或分解)^[30]。研究表明^[31],剪切应力可导致淀粉颗粒在挤压过程中破碎。实际上,挤压过程中传递给淀粉团的机械能和热能都会影响共价键的分解,以及淀粉结构中相邻淀粉聚合物间的氢键分解。这些结构变化使淀粉对酶的敏感性增加、氢键减少、自由羟基增加,挤压对支链淀粉的影响也远大于直链淀粉^[30]。Wen 等^[32]研究发现在挤出过程中,直链淀粉和支链淀粉的平均分子量分别降低了 1.5 和 15 倍。

评价淀粉在挤出过程中的流变特性,对于深入理解淀粉在 3D 打印过程有着重要意义, Xie 等^[33]采用流变仪研究了预制的纯淀粉塑料颗粒,如图 3, 研究结果表明其呈现剪切变稀行为, 现出幂律行为, 且研究发现提高温度或增加水分含量, 幂律指数 n 增加。随着直链成分含量的增加, 幂律指数 n 减小。高支链淀粉表现出更强的牛顿行为。这是由于其链间较少的缠结作用存在。随水分含量和挤出温度的增加, 特定条件下的粘度 K 值减小。随着直链成分含量的增加, K 值增大。高直链玉米淀粉的较高的粘度可以归因于其较高的糊化温度(特别是在高温区的多重相变), 较大程度的分子链缠结, 以及较少形成的凝胶球和超级球。

3.3 淀粉的流变特性与 3D 打印的关系

作为人类饮食中最重要的碳水化合物来源之一, 淀粉在改善加工食品的质量方面得到广泛应用。淀粉在食品烹饪过程中容易发生糊化作用, 而淀粉糊体系在糊化过程中可被视作相互缠绕的淀粉分子的连续相, 具有明显的剪

切变稀行为特性, 适合挤出式三维打印。



注: 水分含量: 23%, 挤出温度: 130 °C。

图 3 淀粉中直链成分含量对淀粉剪切应力和熔融粘度的影响^[33]

Fig.3 effect of starch with different amylose content on shear stress and melting viscosity^[33]

Liu 等^[34]研究了马铃薯淀粉含量对马铃薯泥的三维打印产品的品质的影响。基于此, Kim 等^[35]研究了包括大米淀粉、马铃薯淀粉和玉米淀粉在内的多种淀粉的流变特性和打印特性之间的联系, 发现具有弹粘性的淀粉糊在打印过程中既要保证较高的弹性以便被挤出, 又要保证较高的粘性使得挤出的产品具备较好的形状保持能力, 从而将合适的弹粘性等流变特性与淀粉糊的直链淀粉含量和糊化温度建立起联系, 从而可以确定不同种类淀粉糊体系中淀粉的添加量和挤出温度的范围。实验证明, 15%~25%的淀粉糊体系在 75~80 °C打印温度下具有 140~722 Pa 的流动应力、32~455 Pa 的屈服应力和 1150~6909 Pa 的弹性模量, 适合挤出式三维打印。

4 淀粉类食品三维打印的研究

4.1 淀粉类产品形状稳定性的研究

4.1.1 材料特性与三维打印挤出行为对淀粉类产品形状稳定性的影响

淀粉类食品被认为是一种理想的实验素材, 淀粉的价格便宜、种类较多, 糊化后形成的淀粉凝胶体系具有一定的成型性、粘度和流变特性, 符合三维打印对材料的基本要求, 并且可以通过改变淀粉种类和浓度改变特性, 实现对其他食品材料的特性的模拟。此外, 淀粉本身无异味, 可以与其他组分混合而不会对其他食品的风味产生过多影响。

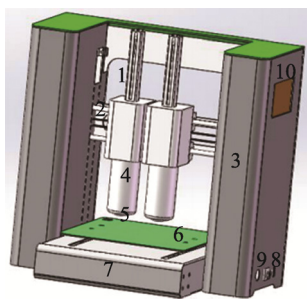
发生高温糊化现象的淀粉水溶液与其他组分交联形成的凝胶体系是很好的食品三维打印材料。研究人员采用往不同的材料体系中添加淀粉后再进行高温糊化处理的方法来改善物料的三维打印特性。Liu 等^[34]重点研究了用于三维打印的添加不同含量马铃薯淀粉的马铃薯泥的流变特性, 发现用于食品打印的马铃薯泥需要同时具备较低的稠

度系数和非牛顿指数保证流动性以及较高的弹性模量保证形状稳定性, 因此添加适中马铃薯淀粉的马铃薯泥同时具备较好的流动性和挤出成型后的形状稳定性。Yang 等^[36]以柠檬浓浆为原料、添加淀粉形成的柠檬浓浆凝胶体系为三维打印材料, 通过调节淀粉种类和添加量改变凝胶的质构性质和流变特性, 确定合适的配方用于三维打印, 发现不同的淀粉种类会影响柠檬浓浆凝胶的水分、流变特性和质构特性, 如添加小麦淀粉后的凝胶具有很大的粘度, 添加红薯淀粉后, 凝胶的弹性和硬度大, 更偏向固体; 添加玉米淀粉后的凝胶内聚性大, 易出现结块和老化现象, 这些性质均不利于后续的打印; 不同的淀粉添加量也会影响柠檬浓浆凝胶的水分、流变特性和质构特性, 淀粉添加量过高会导致凝胶体系的结合水比例增大, 硬度、粘弹性增大, 不利于三维打印过程中物料的挤出, 而淀粉添加量过低会导致凝胶体系自由水比例增大, 流动性好但成型性不足, 不利于打印后形状的维持。在此基础上, 通过计算流体力学软件对物料在三维打印挤出过程进行仿真模拟分析, 确定适合柠檬浓浆凝胶的精准打印成型的工艺条件, 然后进一步研究了具体的三维打印工艺参数对柠檬浓浆凝胶体系打印精度的影响, 最终实现了从单喷头单物料的三维打印到多喷头多物料的三维打印。虽然上述研究揭示了不同种类和含量的淀粉的添加对产品的三维打印形状稳定性的影响机制, 但是有关淀粉的精细分子结构以及常用蛋白质的添加对三维打印形状稳定性的影响机制还没有深入系统的研究报道。

目前应用于食品加工领域的三维打印技术主要包括挤出成型技术、选择性烧结成型技术、粘合剂喷射技术和喷墨打印技术等四种类型^[36-39]。相较于其他类型, 挤出成型技术对食品材料有着相对广泛的适用性, 因而成为最常见的食品三维打印技术^[40-42]。图 4 是基于挤出成型技术的食品三维打印机。目前, 挤出式三维打印的热熔性巧克力、面团、土豆泥、奶酪及肉糜等软性材料在食品领域的应用最为常见^[43,44]。

三维打印成型的过程中产品在重力作用下发生变形是不可避免的, 因而如何最大程度地提高三维打印产品的形状稳定性直至到达消费者满意的程度是非常重要的。一般来说, 三维打印产品的形状稳定性取决于材料特性和三维打印挤出行为。Wang 等^[45]发现具有剪切变稀行为的义齿模具的陶瓷浆料在挤出过程中具有良好流动性而容易被挤出, 同时在沉积叠加过程中能够快速固化凝结而成型, 适合三维打印。Hao 等^[46]研究发现具有假塑性的巧克力浆料可以通过调控喷头挤出时的温度而实现三维打印过程中的精确成型, 同时也研究了打印高度对三维打印精确成型的影响, 并通过数学建模得到三维打印的打印高度的理论最佳值。此外, Yang 等^[44]研究了挤出物料直径、打印高度、打印喷头尺寸和打印喷头移动速度等食品三维打印参数对

面团三维打印形状稳定性的影响,通过数学建模的方法将三维打印挤出行为与挤出时材料的流变学特性联系起来,得到适合食品三维打印的材料。虽然上述研究对淀粉类原料的材料特性和三维打印挤出行为对挤出式三维打印产品的形状稳定性进行了一定程度的探讨,但是关于打印温度对淀粉类凝胶材料打印质量的研究很少,此外,对原料的材料特性和三维打印挤出行为的系统而深入的调控机制的研究也很缺乏。



注: 1: 纵向移动轴, 2: 横向移动轴, 3: 外壳; 4: 料筒, 5: 喷头, 6: 平台, 7: 底座, 8: 接口, 9: 开关, 10: 触屏式控制面板。

图4 食品三维打印机示意图

Fig.4 The schematic of the food printer

4.1.2 后处理对淀粉类三维打印产品形状稳定性的影响

有些打印后不能即食的食品材料可能会受到热加工方式影响其形状稳定性,因此在打印与热加工之间可以适当加入简单有效的后处理方法,以期在不破坏其安全营养美味的品质的前提下,最大限度地维持产品的成型质量。Lipton 于 2010 年将打印的饼干在冰箱中速冻后再烘焙,显著地改善了产品的形状稳定性^[47]。随后 Lipton 等^[48]于 2015 年又用食品打印机成功制作出以深度油炸的干贝、火鸡肉及芹菜等为配料的食品,并添加了谷氨酰胺转胺酶而使这种食品能够在打印后进行热处理熟制。Yang 等^[49]将烘焙面团经超低温冰箱在 $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下速冻后再进行烘焙,发现随着速冻时间的延长,样品内部自由水含量减少,降低了样品的延展性和样品在烘焙中的传质强度,从而提高了样品的形状稳定性,并通过流变测试中的蠕变-恢复试验论证了在烘焙后维持形状的能力最好的三维打印面团产品对应的材料,在相同应力的条件下蠕变回复的变化幅度最小,确实具有最好抗形变能力。Yang 等^[50]又将芒果凝胶的三维打印产品进行一定程度的微波真空干燥,发现在较低的干燥时间的范围内,随着干燥时间的延长,样品的形状稳定性也有所提高。

4.2 易咀嚼淀粉类三维打印产品的研究

除了改进三维打印材料的挤出特性和三维打印产品的形状稳定性之外,三维打印食品的质构和咀嚼特性的改善可以通过改变打印物料的填充率(打印物体内部的填充比例)、填充方式(喷头挤出物料时的路径方式)、外层数及喷头尺寸等工艺条件从而改善三维打印食品的内部结构来

实现^[51]。Liu 等^[52]通过改变打印物料的填充率和填充方式等工艺条件从而改善三维打印食品的质构特性,发现填充方式对三维打印食品的质构特性的影响没有显著差异,而随着填充率的增高,三维打印食品的质构特性包括硬度、胶黏性和杨氏模量均显著地升高。这些研究结果为生产适合老年人和儿童的色香味形俱佳的易吞咽食品提供理论和技术的指导。

5 结论与展望

综上,尽管对于食品三维打印已经有一些相关的研究报道,但对于此项交叉技术的研究才刚刚起步,物料流变特性、相变温度、凝胶形成温度等物料特性和三维打印特性之间的关系的影响机制尚不明确^[53]。物料在三维打印挤出过程中的实际的压力场、速率场分布情况还未见报道。适合于三维打印用的预后处理方式以及通过改变填充模式和填充比来生产适合老年人和儿童的易咀嚼食品等方面还未见报道。因此为了阐明物料特性和三维打印特性之间的关系,需要系统深入研究食品物料结构、打印工艺和食品特性三者之间关系,并且食品体系都非常复杂,原料的种类、化学组成、加热条件及各种添加剂均能影响食品凝胶体系的形成。因此建立物料特性、打印工艺、和预后处理方式和三维打印特性之间的关系对于食品三维打印技术的应用具有重要意义。

本文以建立物料特性、打印工艺和预后处理方式与三维打印特性之间的关系为出发点,通过介绍最常见的挤压式食品三维打印技术的工作原理以及淀粉的结构及物理化学性质,揭示了淀粉的物理化学性质与淀粉类材料三维打印品质之间的联系,从而进一步介绍了材料特性、三维打印挤出行为及后处理方法对淀粉三维打印产品形状稳定性的影响,以及易咀嚼的三维打印产品的相关研究,以期获得适合老年人和儿童的营养美味、易咀嚼的食品。

参考文献

- [1] Rayna T, Striukova L. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation [J]. *Technol Forecast Soc Change*, 2016, 102: 214–224.
- [2] Periard NS, Maor S, Malone E, et al. *Printing food* [M]. Cornell University Press, 2007.
- [3] Sun J, Zhou W, Huang D, et al. An overview of 3D printing technologies for food fabrication [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2015, 8(8): 1605–1615.
- [4] Yang F, Zhang M, Bhandari B, et al. Recent development in 3D food printing [J]. *Critical Rev Food Sci Nutr*, 2017, 57(14): 3145–3153.
- [5] Liu Z, Zhang M, Bhandari B, et al. 3D printing: Printing precision and application in food sector [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2017, 69(Part A): 83–94.
- [6] Jia F, Wang X, Mustafee N, et al. Investigating the feasibility of supply chain-centric business models in 3D chocolate printing: A simulation study [J]. *Technol Forecast Soc Change*, 2016, 102: 202–213.

- [7] Payne R, Dobermann D, Forkes A, *et al.* Insects as food and feed: European perspectives on recent research and future priorities [J]. *J Insects Food Feed*, 2016, 2(4): 269–276.
- [8] Zhuo P. 3D food printer: Development of desktop 3D printing system for food processing [Z]. 2015.
- [9] Pallottino F, Hakola L, Costa C, *et al.* Printing on food or food printing: A review [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2016, 9(5): 725–733.
- [10] 王天明, 金焯, 刁俊通. FDM 工艺过程中丝材的粘结机理与热学分析 [J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(7): 1230–1233.
Wang TM, Jin Y, Xi JT. Bonding mechanism and thermal analysis of plastic filament in the process of FDM [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ*, 2006, 40(7): 1230–1233.
- [11] Chen P, Yu L, Simon GP, *et al.* Internal structures and phase-transitions of starch granules during gelatinization [J]. *Carbohydr Polym*, 2010, 83(4): 1975–1983.
- [12] 刘晓明, 崔波, 檀琮萍. 淀粉与酪蛋白相互作用研究进展 [J]. *乳业科学与技术*, 2012, 35(6): 30–33.
Liu XM, Cui B, Tan ZP. Research progress on the interaction between starch and casein [J]. *Dairy Sci Technol*, 2012, 35(6): 30–33.
- [13] Noisuwan A, Broland J, Wilkinson B, *et al.* Effect of milk protein products on the rheological and thermal (DSC) properties of normal rice starch and waxy rice starch [J]. *Food Hydrocolloid*, 2008, 22(1): 174–183.
- [14] Zuo Y, Hemar Y, Hewitt S, *et al.* Effect of the extent of pasting on the dynamic rheological properties of acidified skim milk gels containing normal rice starch [J]. *Food Hydrocoll*, 2008, 22(8): 1567–1573.
- [15] Mounsey S, O’Riordan D. Alteration of imitation cheese structure and melting behaviour with wheat starch [J]. *Eur Food Res Technol*, 2008, 226(5): 1013–1019.
- [16] Trivedi D, Bennett J, Hemar Y, *et al.* Effect of different starches on rheological and microstructural properties of (I) model processed cheese [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2008, 43(12): 2197–2203.
- [17] Damager I, Engelsen SB, Blennow A, *et al.* First principles insight into the α -glucan structures of starch: Their synthesis, conformation, and hydration [J]. *Chem Rev*, 2010, 110(4): 2049–2080.
- [18] Yao M, Tian Y, Yang W, *et al.* The multi-scale structure, thermal and digestion properties of mung bean starch [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 131: 871–878.
- [19] Li Z, Kong X, Zhou X, *et al.* Characterization of multi-scale structure and thermal properties of Indica rice starch with different amylose contents [J]. *RSC Adv*, 2016, 6: 107491–107497.
- [20] Chen P, Yu L, Simon G, *et al.* Morphologies and microstructures of cornstarches with different amylose-amylopectin ratios studied by confocal laser scanning microscope [J]. *J Cere Sci*, 2009, 50(2): 241–247.
- [21] Chen P, Yu L, Chen L, *et al.* Morphology and microstructure of maize starches with different amylose/amylopectin content [J]. *Starch-Starke*, 2006, 58(12): 611–615.
- [22] Kuang Q, Xu J, Liang Y, *et al.* Lamellar structure change of waxy corn starch during gelatinization by time-resolved synchrotron SAXS [J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 62: 43–48.
- [23] Liu X, Xiao X, Liu P, *et al.* Shear degradation of corn starches with different amylose contents [J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 66: 199–205.
- [24] Atwell WA. The terminology and methodology associated with basic starch phenomena [J]. *Cere Foods World*, 1988, 33: 306–311.
- [25] Lelievre J. Starch gelatinization [J]. *J Appl Polym Sci*, 1974, 18(1): 293–296.
- [26] Liu H, Yu L, Xie F, *et al.* Gelatinization of cornstarch with different amylose/amylopectin content [J]. *Carbohydr Polym*, 2006, 65(3): 357–363.
- [27] Chen P, Yu L, Kealy T, *et al.* Phase transition of starch granules observed by microscope under shearless and shear conditions [J]. *Carbohydr Polym*, 2007, 68(3): 495–501.
- [28] Liu X, Yu L, Liu H, *et al.* In situ thermal decomposition of starch with constant moisture in a sealed system [J]. *Polym Degrad Stabil*, 2008, 93(1): 260–262.
- [29] Liu X, Xiao X, Liu P, *et al.* Shear degradation of corn starches with different amylose contents [J]. *Food Hydrocolloid*, 2017, 66: 199–205.
- [30] Burros BC, Young LA, Carrood PA. Kinetics of corn meal gelatinization at high temperature and low moisture [J]. *J Food Sci*, 1987, 52(5): 1372–1376.
- [31] Lai LS, Kokini L. Physicochemical changes and rheological properties of starch during extrusion (a review) [J]. *Biotechnol Progr*, 1991, 7(3): 251–266.
- [32] Wen F, Rodis P, Wasserman P. Starch fragmentation and protein insolubilization during twin-screw extrusion of corn meal [J]. *Cere Chem*, 1990, 67(3): 268–275.
- [33] Xie W, Yu L, Su B, *et al.* Rheological properties of starches with different amylose/amylopectin ratios [J]. *J Cere Sci*, 2009, 49(3): 371–377.
- [34] Liu Z, Bhandari B, Prakash S, *et al.* Linking rheology and printability of a multicomponent gel system of carrageenan-xanthan-starch in extrusion based additive manufacturing [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 87(2): 413–424.
- [35] Kim H, Lee J, Park S, *et al.* Effect of hydrocolloids on rheological properties and printability of vegetable inks for 3D food printing [J]. *J Food Sci*, 2018, 83(12): 2923–2932.
- [36] 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 Sci Technol*, 2018, 87: 67–76.
- [37] Millen C. The development of a 3D colour food printing system [C]. 2012.
- [38] Lille M, Nurmela, A, Nordlund E, *et al.* Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion based 3D printing [J]. *J Food Eng*, 2018, 220(8): 20–27.
- [39] Godoi C, Prakash S, Bhandari R, *et al.* 3d printing technologies applied for food design: Status and prospects [J]. *J Food Eng*, 2016, 179: 44–54.
- [40] Periard D, Schaal N, Schaal M, *et al.* Printing food [R]. Proceedings of the 18th Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin TX, Citeseer, 2017.
- [41] Tumbleston JR, Shirvanyants D, Ermoshkin N, *et al.* Additive manufacturing. Continuous liquid interface production of 3D objects [J]. *Science*, 2015, 347(6228):1349–1352.
- [42] Wegrzyn TF, Golding M, Archer RH. Food layered manufacture: A new process for constructing solid foods [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2012, 27(2): 66–72.
- [43] Galdeano L. 3D printing food: The sustainable future [C]. 2015.
- [44] Yang F, Zhang M, Prakash S, *et al.* Physical properties of 3D printed baking dough as affected by different compositions [J]. *Innov Food Sci Emerg Technol*, 2018, 49: 202–210.
- [45] Wang J, Shaw L. Rheological and extrusion behavior of dental porcelain slurries for rapid prototyping applications [J]. *Mater Sci Eng*, 2005,

- 397(1-2): 314-321.
- [46] Hao L, Mellor S, Seaman O, *et al.* Material characterisation and process development for chocolate additive layer manufacturing [J]. *Virtual Phys Prototy*, 2010, 5(2): 57-64.
- [47] Le TC. Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese [J]. *J Food Eng*, 2018, 220: 56-64.
- [48] Lipton I, Cutler M, Nigl F, *et al.* Additive manufacturing for the food industry [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2015, 43(1): 114-123.
- [49] Yang F, Zhang M, Liu P, *et al.* Impact of processing parameters and post treatment on the shape accuracy of 3D-printed baking dough [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2019, 54: 68-74.
- [50] Yang F, Zhang M, Liu P, *et al.* Effect of post treatment microwave vacuum drying on the quality of 3D-printed mango juice gel [J]. *Drying Technol*, 2018. DOI: 10.13031/2013.42017
- [51] Schutyser I, Houlder S, De WM, *et al.* Fused deposition modelling of sodium caseinate dispersions [J]. *J Food Eng*, 2017, 2(4): 49-55.
- [52] Liu Z, Bhandari B, Prakash S, *et al.* Creation of internal structure of mashed potato construct by 3D printing and its textural properties [J]. *Food Res Int*, 2018, 111: 534-543.
- [53] Camille T, Sullivan J, Drapala P, *et al.* Effect of 3D printing on the structure and textural properties of processed cheese [J]. *J Food Eng*, 2018, 220: 56-64.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介



杨帆, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: apollous@126.com

“食源性致病微生物”专题征稿函

食源性疾病是指通过摄食而进入人体的有毒有害物质(包括生物性病原体)等致病因子所造成的疾病。近年来,由食源性致病微生物菌污染食物导致中毒或死亡事件在全球频发,食源性致病微生物引起的疾病已成为危害人类健康的头号杀手。食源性疾病患的发病率居各类疾病总发病率的前列,是当前世界上最突出的公共健康卫生问题。

鉴于此,本刊特策划“食源性致病微生物”专题,由上海交通大学施春雷教授担任专题主编,主要围绕**食源性致病微生物新型快速检测技术、食源性致病微生物的分离与检测、食源性致病微生物的毒力与耐药性、食源性致病微生物风险评估、食源性致病微生物的监测与风险控制与监测分析、食源性致病微生物防控与风险评估**等展开论述和研究。本专题计划在2020年1月正刊出版。

鉴于您在该领域丰富的研究经历和突出的学术造诣,主编吴永宁技术总师及专题主编施春雷教授特别邀请您为本专题撰写稿件,综述、研究论文、研究简报均可,以期进一步提升该专题的学术质量和影响力。请在2019年12月1日前通过网站或Email投稿。我们将快速处理并经审稿合格后优先发表。

同时烦请您帮忙在同事之间转发一下,再次感谢您的关怀与支持!

投稿方式: 注明“**食源性致病微生物**”专题

网站: www.chinafoodj.com

E-mail: jfoodsq@126.com

《食品安全质量检测学报》编辑部