

文章编号:2095-7386(2023)04-0010-07

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2023.04.002

淀粉糊化新技术对即食冲调粉冲调特性的改善

李婉冰¹, 蒋晓宇¹, 刘颖¹, 卢玥¹, 邹爱军², 常超¹

(1. 武汉轻工大学 食品科学与工程学院, 武汉 430023; 2. 武汉慧康利兹食品有限公司, 武汉 432200)

摘 要:淀粉是人体热量的主要来源,它是由葡萄糖组成的天然高分子碳水化合物。因其耐酸碱性差、耐剪切力差及冷水不溶性等特点限制了其实际应用。糊化后的淀粉具有增稠、保形、改善分散性、粘性的优良特性,同时淀粉糊化还可以使食品变得松软可口,适口性好,且易被人体的淀粉酶水解,在食品中得到了广泛应用。本文综述了挤压技术、过热蒸汽技术、超声技术、高压均质技术、微波技术等淀粉的糊化新技术,并分别讨论了不同糊化技术对淀粉糊化品质的影响。同时,重点阐述了糊化技术对即食冲调粉一次冲调特性的改善作用,为开发一次冲调的即食冲调粉提供一定的技术参考。

关键词:淀粉;糊化技术;即食冲调粉;冲调特性

中图分类号:TS 213

文献标识码:A

Research on new technology of starch gelatinization and improvement of starch blending characteristics of instant powder

LI Wanbing¹, JIANG Xiaoyu¹, LIU Ying¹, LU Yue¹, ZOU Aijun², CHANG Chao¹

(1. School of Food Science and Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China;

2. Wuhan Huikang Leeds Food Co., Ltd., Wuhan 432200, China)

Abstract: Starch is the main source of calories in the body, and it is a natural polymer carbohydrate composed of glucose. Due to its poor acid and alkali resistance, poor shear resistance and cold water insolubility, its practical application is limited. The gelatinized starch has excellent characteristics of thickening, conformity, improving dispersion and viscosity, while starch gelatinization can also make food soft and delicious, palatability, and easy to be hydrolyzed by the human amylase, which has been widely used in food. In this paper, the new technologies of starch gelatinization, such as extrusion technology, superheated steam technology, ultrasonic technology, high-pressure homogenization technology, and microwave technology, are reviewed, and the effects of different gelatinization technologies on starch gelatinization quality are discussed separately. At the same time, the effect of gelatinization technology on the improvement characteristics of instant powder is emphasized, which provides a certain technical reference for the development of instant powder.

Key words: starch; gelatinization technology; instant powder; starch blending characteristics

收稿日期:2023-07-11.

作者简介:李婉冰(1998-),女,硕士研究生,E-mail:2439584618@qq.com.

通信作者:常超(1976-),男,教授,硕士生导师,E-mail:changchao2000@163.com.

基金项目:大宗粮油精深加工教育部重点实验室开放课题(编号:2020JYBQGDKFB02,2020JYBQGDKFB17).

1 引言

淀粉是人体热量的主要来源,它是由葡萄糖聚合而成的高分子碳水化合物^[1]。其作为一种天然的植物多糖,以微小颗粒的形式广泛存在于植物的根、茎、叶和果实中^[2],主要从玉米、甘薯等含淀粉多的植物中获取。由于其具有在常温下不易溶于水、难被酶解的性质,在应用时一般需要糊化或预糊化处理。糊化是当水被加热至某一临界值,水中淀粉的物理性能会发生明显变化,继续加热至更高温度,淀粉会发生吸水、溶胀、分裂并形成均匀糊状溶液^[3]。淀粉糊化的实质是微晶束熔融的过程,糊化后淀粉分子间氢键断裂,水分子进入淀粉微晶束结构,淀粉的束状结构遭到破坏^[4]。糊化后的淀粉具有增稠、保形、改善分散性、黏性的优良特性,同时淀粉糊化还可以使食品变得松软可口,适口性好,且易被人体的淀粉酶水解,在食品中得到了广泛应用^[5]。

目前对淀粉进行糊化的方法越来越多,且不断优化,形成了许多比较成熟的工艺。除常规热糊化方法外,微波技术、超声技术等也应用到了淀粉糊化中,这使得淀粉糊化有了更广阔的应用前景。冲调粉的基本成分就是淀粉,其冲调原理是淀粉的糊化。为了紧跟人们的快节奏生活,市面上出现了不计其数的冲调粉,但其中存在较多问题,一部分是冲调品质太差,另一部分是需要二次冲调,不能满足人们的需求。考虑到淀粉糊化新技术对糊化品质的改善作用和冲调粉冲调性与糊化特性的相关性,可以将淀粉糊化新技术应用到冲调粉中,以研究糊化技术对冲调粉的改善作用,从而获得一次冲调的高品质冲调粉。本文综述了淀粉糊化新技术对淀粉糊化品质的影响,以及糊化技术对即食冲调粉一次冲调特性的改善作用,以期为进一步开发一次冲调的即食冲调粉提供一定的技术参考。

2 淀粉糊化新技术

2.1 挤压技术

挤压技术是一种连续高温短时蒸煮过程,结合了加热、压力、相对低含水量的高剪切力,该挤压过程会导致淀粉分子的糊化^[6]。与其他食品加工技术相比,挤压技术具有营养成分损失少、生产时间短、原料适应性强、耗能低、操作简单、生产效率高等优点,具有良好的利用价值^[7]。其作为一种常见的食品加工方式,已在谷类、薯类、豆类等淀粉原料加工中得到广泛应用。

与传统加热糊化相比,挤压膨化法使淀粉糊化度明显提高,糊化度与挤压的温度、压力、剪切力、含水量有关。有资料报道,淀粉经挤压膨化处理后其糊化度能达到 90% 以上,而传统加热糊化率仅为 80%~85%^[4]。淀粉在挤压过程中通常被糊化,糊化程度随着模头温度和进料速度的增加而增加^[7]。延长物料在挤压机内停留的时间,其受高温、高压、高剪切力的作用更充分,有利于改善淀粉的糊化特性^[3]。郭静璇^[8]发现,在挤压温度较低时,淀粉糊化不够充分、黏度大,制得米线产品结构松散。随着挤压温度升高,淀粉进一步糊化,米线产品内部结构更加均匀紧密。Wang 等^[9]研究发现,挤压玉米淀粉的吸水率较原生玉米淀粉明显提高,这表明玉米淀粉在挤压过程中发生了糊化反应。随着含水量的增加,玉米淀粉的糊化程度增加,说明挤压过程中水分含量也会影响玉米淀粉的糊化反应。董宇晴^[1]等研究表明,挤压淀粉样品的黏度和回生值显著低于天然淀粉,说明经挤压处理后淀粉的凝胶稳定性提高,短期回生减少。这是因为在挤压过程中,由于高温和高剪切力,淀粉颗粒的完整性会遭到破坏,淀粉分子发生降解。

2.2 超声技术

超声处理作为一种环保、安全、高效的绿色技术,受到了越来越多的关注。它是一种利用频率在 18 kHz 到 1 GHz 之间的声波产生的能量来搅拌溶液中的悬浮颗粒的技术^[10]。超声处理淀粉,具有处理时间短、降解非随机性、操作简单等优点,被广泛用于淀粉糊化中^[11]。

超声处理主要是通过热效应、机械效应、空化效应等促进淀粉分子链运动,改变淀粉颗粒内部原有氢键及双螺旋结构^[12]。由于超声可诱导淀粉表面断裂和颗粒腔的变化,被认为是一种独特的有效影响淀粉改性的方法^[10]。王琦^[11]等采用不同的超声时间处理糙米淀粉,发现处理后的糙米淀粉的黏度和回生值较未处理的糙米淀粉都有显著下降。这一结果表明经超声处理的淀粉与水分子的结合能力减小,热稳定性增强,老化能力减弱,具有较强的抗剪切和抗氧化能力。陆兰芳^[12]等在不同超声功率下处理小米淀粉,发现其黏度显著下降,糊化温度无显著变化,崩解值和回生值有所降低。黏度降低是由于超声处理导致淀粉部分大分子链断裂,结晶结构发生改变,流动阻力减小。崩解值有所减小,说明经过处理之后的小米淀粉热稳定性更高。回生值降低是由于超声处理使淀粉双螺旋结构暴露更多的羟

基,增加了淀粉分子与水分子的相互作用。Wang^[13]等研究发现随着超声处理时间的增加,淀粉的溶胀力和溶解度增加,糊化温度和黏度降低,表明超声处理过程中淀粉颗粒的结构遭到破坏。

2.3 过热蒸汽技术

过热蒸汽是一种二次加热蒸汽,是通过在给定压力下将饱和干蒸汽加热到一定温度而获得的。与传统加热技术(干热和水热处理)相比,过热蒸汽技术具有多项优势,如受热均匀、安全、环保等,同时还具有更高的传热性能和能效,从而节省时间和能源^[14]。

过热蒸汽处理所导致的淀粉糊化特性的改变是十分特殊的,过热蒸汽处理初期较高的温度和物料表面产生的冷凝水会造成淀粉的轻微糊化;同时改变淀粉颗粒的膨胀度,从而影响淀粉颗粒的黏度;除此之外还会改变淀粉颗粒的形态,这与处理过程中的处理温度、处理时间以及形成的冷凝水等密切相关^[15]。贾泽宇^[15]等采用过热蒸汽处理谷物淀粉时发现,处理后的淀粉颗粒出现凹陷以及表面粗糙化,该现象一般会随着蒸汽温度的上升和处理时间的延长而加剧。溶解度值显著降低,表明过热蒸汽处理促进了小麦淀粉颗粒膨胀吸水,抑制了小麦淀粉的溶解。马岁祥^[16]等发现,玉米、马铃薯、豌豆淀粉经过热蒸汽处理后,其黏度和崩解值与原淀粉相比,均极显著降低,说明过热蒸汽处理后淀粉的糊化稳定性和抗剪切性明显增强;回生值均极显著减小,表明淀粉的抗回生性显著提高;糊化焓均显著减小,是由于淀粉分子在强热和水分的共同作用中,促使淀粉双螺旋结构解旋,导致淀粉颗粒结构疏松,糊化所需的能量降低。Ma^[17]等研究发现,经过热蒸汽处理后,小麦淀粉的溶解度、黏度降低,但糊化温度较高,这可能是由于淀粉颗粒部分糊化所致。

2.4 高压均质技术

高压均质技术作为一种物理方法,因其短时、稳定、高效的特点,近年来在淀粉研究中被广泛关注^[18]。该技术基于流体力学和超高压技术,通过高压在均质腔中形成压力差,产生机械力,从而对淀粉产生剪切、撞击、高频振荡等作用,来改变淀粉的理化性质^[19]。作为传统热处理的一种替代方法,超高压所达到的糊化程度取决于淀粉类型、压力水平、含水量、温度范围和处理时间,在一定条件下,可以使淀粉充分糊化^[20]。超高压作为一种非热改性加工技术,已被应用于不同品种淀粉的糊化或物理改性^[20]。

高压均质产生的剪切作用可以破坏淀粉颗粒的晶体结构,从而影响淀粉的糊化特性^[18]。刘军平^[21]等通过高压均质处理大米淀粉时发现,处理后的样品黏度降低、热稳定性增加、老化程度减弱。Qiu^[22]等在研究高压均质处理小麦淀粉时发现,当均质压力达到 100 MPa 时,小麦淀粉的初始糊化温度、糊化峰值较原淀粉比有所下降。该现象是由于在 100 MPa 下均质处理,小麦淀粉的结晶区遭到破坏,诱导小麦淀粉糊化。此外,高压均质会破坏淀粉分子中的 α -1,6 糖苷键,使直链淀粉比例增加,分子质量降低,从而降低淀粉的凝沉性,改善淀粉品质^[18]。Liu^[23]等研究表明,在 120~480 MPa 下处理的高粱淀粉,其黏度和回生值变化不大,但在 600 MPa 下处理时,其数值均有明显的降低。

2.5 微波技术

微波是一种高频电磁波,频率范围一般为 300 MHz~300 GHz,具有热效应和非热效应^[24]。作为一种高频电磁波,它能更好地被极性分子所组成的物质吸收;在淀粉溶液中,水分子呈强极性,是吸收微波的最好介质,并且淀粉颗粒中的羟基为极性基团,也能吸收微波^[4]。同时微波加热具有热速度快,受热均匀,易于控制的优点。

微波处理会导致淀粉颗粒的形貌及结构的破坏,从而影响淀粉的理化性质。陈楚瑶^[25]等研究表明,在相同处理时间,不同功率处理下,随着微波功率的增大红豆粉的回生值有下降的趋势,表明微波处理使淀粉颗粒更加稳定,冷糊稳定性好。Oyeyinka^[26]等研究发现,微波处理能使花生淀粉结晶度下降,直链淀粉含量和糊化温度随着微波时间的增加而增加,但黏度降低。Emami^[27]等研究表明,微波处理可使淀粉糊化焓下降,糊化温度范围扩大。糊化焓下降是由于淀粉颗粒结晶区或无定形区的部分双螺旋结构随水的高频振动遭到破坏,导致分子间氢键作用减弱,使得解旋时所需能量减小。Sun^[29]等将微波技术应用于藕粉时发现,在低功率(300 W)下,微波处理后藕粉的糊化温度和峰值黏度变化不明显,但随着微波处理功率增加到 700 W,峰值黏度下降,糊化温度较天然藕粉有所升高。

2.6 淀粉糊化新技术的比较

本文详细综述了 5 种淀粉糊化新技术的原理及其应用,通过对比发现不同的糊化技术也存在着各自的优势和不足(表 1)。因此,针对不同来源的淀粉,为了提高淀粉糊化后的特性,可以将多种方法联用,以达到最佳效果的目的。

表 1 淀粉糊化新技术的比较

Table 1 Comparison of new technologies for starch gelatinization

淀粉糊化技术	优点	缺点	应用
挤压技术	生产时间短、原料适应性强、成本低、操作简单、适合工业化连续生产	淀粉颗粒结构被完全破坏,产品黏度下降	葛粉 ^[29] 、冲调婴儿复配米粉 ^[30] 、猴头菇-青稞预糊化粉 ^[31] 、黑豆 ^[32]
超声技术	环保、安全、高效、易控制、操作简单、透明度较好	规模小,淀粉颗粒表面出现裂缝、凹塌	豌豆淀粉 ^[10] 、糙米淀粉 ^[11] 、小米淀粉 ^[12] 、甘薯淀粉 ^[13]
过热蒸汽技术	受热均匀、传热效率高、安全、绿色环保	淀粉颗粒出现凹陷、表面粗糙,溶解度降低,淀粉颜色可能发生改变	谷物淀粉 ^[15] 、玉米、马铃薯、豌豆淀粉 ^[16] 、小麦淀粉 ^[17]
高压均质技术	短时、稳定、高效,淀粉溶解度、透明度增加	成本较高、耗能大,产品黏度降低	淀粉 ^[19] 、小米淀粉 ^[20] 、小麦淀粉 ^[22] 、高粱淀粉 ^[23]
微波技术	热速度快,受热均匀,易于控制	不易控制加热温度、能耗大	玉米淀粉 ^[24] 、红豆 ^[25] 、花生淀粉 ^[26] 、大麦淀粉 ^[27] 、藕粉 ^[28]

3 淀粉糊化对即食冲调粉冲调性的改善作用

3.1 即食冲调粉冲调结块机理

随着社会的不断发展,人们的生活节奏也越来越快,方便食品应运而生。冲调粉作为即食冲调食品,具有携带方便、即饮即冲的优点,受到了人们的广泛关注。随着其需求量日益增多,市面上出现了各类品种的冲调粉,但冲调效果不佳。冲调粉的基础

成分是淀粉,淀粉不溶于冷水,但加入沸水冲调,淀粉便会膨胀,变成具有黏性的半透明糊状胶体,发生糊化现象。而冲调粉冲调的原理就是淀粉的糊化,冲调过程中产生的结块主要是淀粉糊化不完全。以葛粉为例进一步阐明即食食品冲调结块机理(图 1),葛粉与热水接触后迅速糊化,形成凝胶网络包裹剩余未糊化的葛粉,阻碍水分进一步渗透,导致凝胶网络结构内部的葛粉颗粒因无法获得充足的水分而不能完全糊化,最终导致夹生、结块现象^[29]。

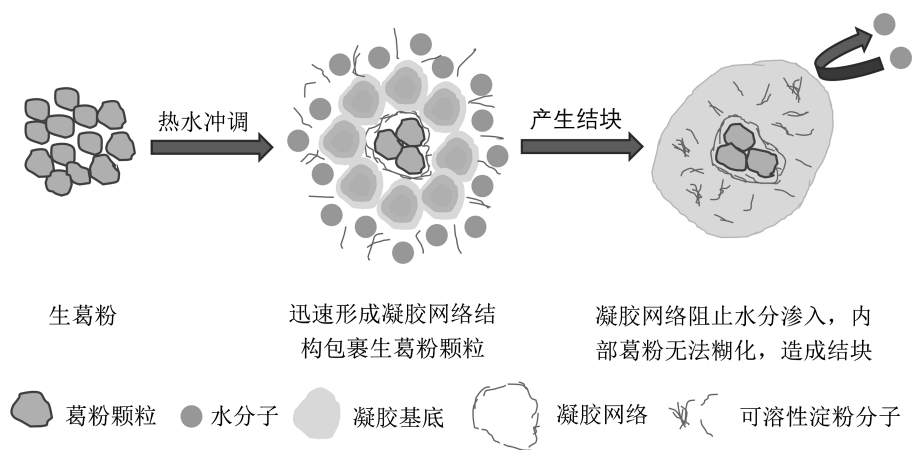


图 1 葛粉热水冲调的结块机理

Fig. 1 Agglomeration mechanism of arrowroot hot water preparation

3.2 即食冲调粉冲调评价指标

即食冲调粉冲调品质依赖于冲调性,冲调性的评价指标包括润湿性、分散性、溶解性、结块率、黏稠度、糊化度等几个方面,具体特性详见表 2。提高即食冲调粉的品质,应该综合评价这些指标。目前,大

部分即食冲调粉是先用冷水调芡,再用热水冲调。该方法增加了冲调时间,冲调过程烦琐,给消费者带来了不便。因此,一次冲调技术是即食冲调粉的研发趋势,其中糊化技术可以有效地提高即食冲调粉的品质。

表 2 冲调性评价
Table 2 Evaluation of tonality

指标 ^[34-35]	评价
润湿性	润湿性表示水吸附在淀粉颗粒表面与内部的能力 ^[33] 。润湿性越好,淀粉颗粒与水的吸附能力越大,淀粉颗粒更易润湿,冲调性也更好。
分散性、沉降性	冲调分散性是冲调特性中重要的性质,是决定产品冲调性好坏的重要标准;冲调沉降性反映了溶液的稳定性。分散时间、分散稳定时间分别是评价冲调分散性、冲调沉降性的重要指标 ^[36] 。分散时间越短,分散稳定时间越长,表明冲调性越好。
溶解性	溶解性主要由水溶性指数(WSI)、吸水性指数(WAI)来体现 ^[36] 。WSI 是淀粉降解转化程度的参数,表示溶于水的能力;WAI 主要反映样品吸水膨胀后形成凝胶的体积,表示吸水膨胀的大小 ^[37] 。WSI 越高,WAI 越低,结块率越小,冲调性越好。
结块率	结块率是评价冲调粉复水情况和冲调性质的良好指标,反映了冲调粉在水中的分散能力 ^[37] 。结块率越小,表明冲调性越好。
黏稠度	黏稠度是葛粉冲调后食用品质的一个重要评价指标,这个指标可以通过流变性质表征 ^[38] 。具有良好冲调性的物料,在冲调时形成的糊状物黏度适中,质构细腻均匀。
糊化度	糊化度可用于表征营养粉消化性。糊化度越高,越容易被人体消化吸收 ^[36] 。

3.3 糊化技术改善即食冲调粉一次冲调特性

为了得到冲调性更佳、品质更好的冲调粉,主要思路有抑制糊化进程,提高吸水速率,提高其在水中的分散性和溶解度^[38]。冲调粉要实现一次冲调,其中淀粉的糊化是关键。

为了更好的实现一次冲调技术,研究人员摸索出了大量的改良技术。张志林^[38]等研究发现,喷雾干燥和冷冻干燥制备的葛粉-脂肪酸复合物,用(95±2)℃热水一次冲调后,结块率为4.6%~6.0%,比原葛粉降低36.3%以上,可能是葛粉与脂肪酸复合后糊化速率降低,使其在热水中无法快速形成凝胶网络,从而避免了葛粉颗粒因被凝胶网络包裹不能充分吸水而导致的结块现象。肖家喜^[39]等采用酶解耦合挤压膨化法改善山药粉一次冲调性,该方法制备的山药粉的WSI为42.80%、WAI为2.60、结块率为1.14%。其主要原因为淀粉得到充分糊化、高温 α -淀粉酶作用得到增强。师小飞^[40]糊化处理苦楮淀粉,处理后冲调性得到明显改善,冲调性分数为96.98±0.91分。糊化处理后苦楮淀粉的一次冲调性变好,可能是因为糊化处理后苦楮淀粉的糊化温度升高、时间延长、黏度下降,减轻了冲调时局部糊化结团,使样品的分散性更好,润湿更充分。邵子晗^[37]等对米粉进行预糊化处理时发现,处理后米粉的冲调特性得到显著改善。与未预糊化处理样品相比,经过30 min预糊化后,吸水性指数和水溶性指数显著增加9%和50%,结块率下降了1.87%,糊化度增加21%。主要是由于随预糊化时间延长,形成凝胶的速度加快。Wang^[41]等研究发现,采用

低含水量(10%、15%、20%)挤压处理葛粉可以防止葛粉在复水过程中结块。挤压过程中压力的急剧下降导致粉末膨化,促使水迅速渗透到粉末中。同时,挤压处理破坏了葛根粉的颗粒和晶体结构。因此,葛根粉的润湿性、水溶性、吸水性都得到了显著提高,解决了一次冲调的团聚问题。戴晓慧^[42]等研究发现,与直接挤压膨化相比,蒸汽酶解调质-挤压膨化制得的速食米粉的WSI提高了96.60%,WAI、结块率分别降低了72.68%、51.39%。叶翌冬^[43]将超高压与高压均质相结合,制备速溶薏米粉,所得速溶薏米粉的溶解度增大、结块率降低、分散性较好,冲调性得到改善。Wu^[44]等研究发现,在水分含量为20%时,过热蒸汽处理(SST)在不破坏葛根淀粉微观结构、不影响葛根淀粉糊流变性能的前提下,将葛根淀粉的团聚率从42.20%大幅降低至2.97%,优于常规的预糊化处理。SST抑制葛粉冲调结块的原因是SST显著降低了葛粉的溶胀性,同时提高了葛粉的糊化温度,延缓了葛粉在热水冲调时黏度的快速上升,从而为葛粉充分吸水争取了时间。充分吸水后的葛粉在热水的作用下能被糊化完全,从而降低结块,实现一次冲调。

4 总结与展望

尽管淀粉的糊化方式不同,但微观上都是破坏了淀粉颗粒晶体结构中的分子间和分子内氢键,最终使淀粉分子发生充分水合。不同的淀粉糊化方式都有各自的优缺点,可以将不同糊化方式进行联合使用,提高淀粉的糊化品质,从而更好地应用于生产

中。糊化淀粉有较好的应用前景,大量的研究使糊化技术愈加成熟,糊化淀粉结构性质的研究成果也不断增多。淀粉的糊化特性在即食冲调粉中也得到了充分体现,由于即食冲调粉的冲调性能与糊化密切相关,所以可以利用淀粉糊化技术对其冲调性能进行改良,目前的改良技术主要有挤压膨化技术、过热蒸汽技术、高压均质技术、酶解技术等,今后的研究方向可以从以下方面入手:(1)研究新的淀粉糊化技术,尽可能保留、完善并附加其新性能,以提高应用价值;(2)超声技术、微波技术等糊化新技术未来可以将其应用到一次冲调中,研究更高品质的冲调粉;(3)研发营养型冲调粉,使其可以满足人们日常的营养需求;(4)推进联合技术的发展,弥补单一技术的不足。

参考文献:

- [1] 董宇晴,燕守鑫,崔波,等. 挤压处理对淀粉结构与糊化性质的影响[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(12):43-48.
- [2] 宋璐璐,马梦婷,徐义娟,等. 热加工对淀粉结构和理化性质的影响研究进展[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(3):111-117.
- [3] 张俊杰,于小帅,王振国,等. 挤压技术对淀粉理化特性影响的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(12):30-33.
- [4] 黄峻榕,张佩,李宏梁. 淀粉的不同糊化方法[J]. 食品科技, 2008, 203(9):20-23.
- [5] 吴昊,张青,邵娟娟. 糊化淀粉的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(1):6-8.
- [6] Yan X, Wu ZZ, Li M Y, et al. The combined effects of extrusion and heat-moisture treatment on the physicochemical properties and digestibility of corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134:1108-1112.
- [7] 高嫚,贾健辉,张楚佳等. 挤压技术在淀粉及淀粉基食品中的应用[J/OL]. 食品工业科技:1-12[2023-07-11]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100084>.
- [8] 郭静璇. 挤压法马铃薯米线的生产工艺和品质改良研究[D]. 无锡:江南大学, 2016.
- [9] Wang B, Dong YQ, Fang Y X, et al. Effects of different moisture contents on the structure and properties of corn starch during extrusion [J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130804.
- [10] Han L H, Cao S P, Yu Y T, et al. Modification in physicochemical, structural and digestive properties of pea starch during heat-moisture process assisted by pre-and post-treatment of ultrasound[J]. Food Chemistry, 2021, 360:129929.
- [11] 王琦,王周利,蔡瑞,等. 超声处理对糙米淀粉的结构与理化特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(1):60-65.
- [12] 陆兰芳,扎西拉宗,吴进菊,等. 超声处理对小米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(24):60-67.
- [13] Wang H W, Xu K, Ma Y, et al. Impact of ultrasonication on the aggregation structure and physicochemical characteristics of sweet potato starch[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63(C):104868.
- [14] Ma Y S, Zhang H, Jin Y M, et al. Impact of superheated steam on the moisture transfer, structural characteristics and rheological properties of wheat starch[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122:107089.
- [15] 贾泽宇,刘远晓,卞科等. 过热蒸汽对谷物淀粉结构及理化特性影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(12):288-293.
- [16] 马岁祥,李涛,宋洪波等. 过热蒸汽改性典型晶型淀粉的理化性质研究[J]. 中国食品学报, 2018, 18(8):99-106.
- [17] Ma Y S, Zhang W Y, Pan Y J, et al. Physicochemical, crystalline characterization and digestibility of wheat starch under superheated steam treatment [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118:106720.
- [18] 李子钰,林新,陆佳慧,等. 高压均质技术在淀粉改性中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(6):21-23.
- [19] Meng S, Ma Y, Sun D, et al. Properties of starch-palmitic acid complexes prepared by high pressure homogenization[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 59(1):25-32.
- [20] Li W, Gao J, Saleh M S A, et al. The modifications in physicochemical and functional properties of proso millet starch after Ultra-High pressure (UHP) process[J]. Starch - Stärke, 2018, 70(5-6).

- [21] 刘军平,禹凯博,孙悦芳,等.均质及大米蛋白对大米淀粉糊化和质构特性的影响[J].中国粮油学报,2020,35(1):1-6.
- [22] Qiu S, Li Y, Chen H, et al. Effects of high-pressure homogenization on thermal and electrical properties of wheat starch[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 128: 53-59.
- [23] Liu H, Fan H, Cao R, et al. Physicochemical properties and in vitro digestibility of sorghum starch altered by high hydrostatic pressure[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 753-760.
- [24] 蒲华寅,陈旭艳,郭思敏,等.微波处理对不同链/支比玉米淀粉结构及理化性质的影响[J].陕西科技大学学报,2022,40(2):39-45.
- [25] 陈楚瑶,李丹丹,陶阳,等.微波预处理对红豆吸水特性、外观及淀粉特性的影响[J].食品工业科技,2023,44(1):56-64.
- [26] Oyeyinka A S, Umaru E, Olatunde J S, et al. Effect of short microwave heating time on physicochemical and functional properties of Bambara groundnut starch[J]. Food Bioscience, 2019, 28: 36-41.
- [27] Emami S, Perera A, Meda V, et al. Effect of microwave treatment on starch digestibility and physico-chemical properties of three barley types[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(6): 2266-2274.
- [28] Sun X X, Sun Z Z, Saleh A S M, et al. Effects of various microwave intensities collaborated with different cold plasma duration time on structural, physicochemical, and digestive properties of lotus root starch. [J]. Food chemistry, 2022, 405 (Pt A): 134837.
- [29] 徐顺前.基于过热蒸汽技术改良葛粉冲调性和消化性[D].南昌:南昌大学,2022.
- [30] 曹家宝.冲调婴儿复配营养米粉的研制及品质评价[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2020.
- [31] 马宁,陈雨婷,方东路,等.猴头菇-青稞预糊化粉的添加对桃酥品质的影响[J].食品科学,2020,41(20):46-53.
- [32] Alejandro E, Guadalupe P L, Marcela M G, et al. Autoclaving and extrusion improve the functional properties and chemical composition of black bean carbohydrate extracts. [J]. Journal of food science, 2020, 85(9): 2783-2791.
- [33] 于冰垚.改善葛粉制品冲调性的研究[D].武汉:武汉轻工大学,2016.
- [34] 卢成特,苏小军,李清明等.淀粉类速溶即食粉的研究进展[J].食品工业,2019,40(3): 258-262.
- [35] 费永涛,郑文雄,陈燕清,等.代餐粉特性及加工生产的研究进展[J].食品安全质量检测学报,2021,12(9):3557-3564.
- [36] 李学琴,秦礼康,张秀军.挤压膨化茯苓复合营养粉冲调性研究及营养评价[J].食品与机械,2018,34(1):192-198.
- [37] 邵子晗,洪莹,曹磊,等.预糊化时间对即食冲调米粉品质的影响[J].食品科学,2022,43(4):53-59.
- [38] 张志林,张璇,徐苑瑞,等.干燥方式对葛粉-脂肪酸复合物冲调性的影响[J].食品与机械,2022,38(6):52-57,136.
- [39] 肖家喜,段映羽,张瑞芬等.酶解耦合挤压膨化处理改善山药粉冲调性和预消化性的工艺优化[J].现代食品科技,2023,39(4):163-171.
- [40] 师小飞.糊化与湿热处理对苦槠淀粉冲调性和挥发性风味物质的影响[D].南昌:南昌大学,2021.
- [41] Wang H Q, Wu J Y, Luo S J, et al. Improving instant properties of kudzu powder by extrusion treatment and its related mechanism [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101 (C): 105475.
- [42] 戴晓慧,张名位,马永轩,等.蒸汽酶解调质-挤压膨化工艺改善速食米粉冲调分散性和预消化性[J].现代食品科技,2020,36(10): 200-209.
- [43] 叶翌冬.超高压改性薏米粉及应用研究[D].福州:福建农林大学,2015.
- [44] Wu J Y, Xu S Q, Huang Y, et al. Prevents kudzu starch from agglomeration during rapid pasting with hot water by a non-destructive superheated steam treatment[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132819.