

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.03.015

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.

SONG L L, MA M T, XU Y J, et al. Research progress in the effect of thermal treatments on the structural and physicochemical properties of starch[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(3): 111-117.

热加工对淀粉结构和理化性质的影响研究进展

宋璐璐, 马梦婷, 徐义娟, 陈小静, 许泽坤, 隋中泉✉

(上海交通大学 农业与生物学院 食品科学系, 上海 200240)

摘要: 淀粉是一种非常重要的植物多糖, 同时也是重要的食品生产加工的工业原料。天然淀粉耐热、耐剪切、耐酸能力差, 且易回生, 需要对淀粉进行物理改性、化学改性和酶改性。在淀粉改性尤其是化学改性中, 化学试剂易残留于改性淀粉中, 所以快速、安全的物理改性越来越受到大家关注。而物理改性中, 热加工改性应用较为广泛。通过概述六种常用的热加工改性技术对淀粉结构及性能的影响, 旨在为热加工改性淀粉理化性质的研究提供理论参考, 以期能为特定需求淀粉的生产研发提供一定的理论依据。

关键词: 热加工; 淀粉; 理化特性; 热加工改性; 改性淀粉

中图分类号: TS231 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)03-0111-07

网络首发时间: 2021-04-16 15:18:08

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20210416.0855.002.html>

Research Progress in the Effect of Thermal Treatments on the Structural and Physicochemical Properties of Starch

SONG Lu-lu, MA Meng-ting, XU Yi-juan, CHEN Xiao-jing, XU Ze-kun, SUI Zhong-quan✉

(Shanghai Jiao Tong University, School of Agriculture and Biology,
Department of Food Science, Shanghai 200240, China)

Abstract: Starch is a very important plant polysaccharide, which is also an important industrial raw material for food production and processing. Since natural starch has poor heat, shear and acid resistance, and is easy to retrograde. It is necessary to carry out physical modification, chemical modification and enzyme modification. Among starch modification, especially chemical modification, chemical reagents are easy to remain in modified starch, so rapid and safe physical modification has attracted more and more attention. In physical modification, thermal processing modification is widely used. This paper summarizes the effects of six thermally treated technologies on the structure and properties of starch, aiming to provide a theoretical reference for the research on physicochemical properties of physically modified starch, in order to provide a certain theoretical basis for the production and development of starch with specific needs.

收稿日期: 2020-11-06

基金项目: 上海交通大学决策咨询课题 (JCZXSJA2019-001)

Supported by: Decision Consulting Project of Shanghai Jiao Tong University (No. JCZXSJA2019-001)

作者简介: 宋璐璐, 女, 1990 年出生, 在读硕士生, 研究方向为淀粉改性。E-mail: slltwxq@sjtu.edu.cn.

通讯作者: 隋中泉, 女, 1981 年出生, 博士, 教授, 研究方向为碳水化合物。E-mail: suiz@sjtu.edu.cn.

Key words: thermal treatments; starch; physicochemical properties; thermal processing modification; modified starch

淀粉是一种天然的植物多糖,以颗粒形式广泛存在于植物的果实、根、茎、叶中,是人类碳水化合物的主要来源之一。然而,随着社会的发展,淀粉受其自身物理化学性质的限制,已经不能满足现代工业和食品生产的要求。因此,迫切需要进行淀粉改性以增强其特定的功能特性并弥补天然淀粉某方面的不足^[1]。目前常用的改性方法有化学改性、物理改性和酶改性。在淀粉改性尤其是化学改性中,虽然改性效率高,但化学试剂的副产物仍存在于改性淀粉中,造成安全性问题。因此,近些年基于水分、热量、剪切或辐射的物理改性技术已受到大家的广泛关注^[2]。当前最常用的物理改性是热处理。淀粉的热加工改性不涉及淀粉聚合物分子的 D-吡喃葡萄糖基单元的改变,通常仅会改变颗粒内淀粉聚合物分子的堆积排列以及淀粉颗粒的整体结构,这种变化可能会对淀粉的性质,其糊化和黏度特性甚至其消化率产生重大影响。热处理方法是改变淀粉结构和性质的有效方法,但不同的处理条件及不同的淀粉品种,其对淀粉结构和性质的影响程度不尽相同。目前关于物理改性淀粉已经开展了许多研究,但是仍然存在很多问题。首先,物理改性方法存在设备昂贵、成本较高、不能实现工业化生产等问题。其次,相较于化学和酶法改性的精确性与可控性,物理改性结果不可预期,从而大大限制了人们对物理改性淀粉的应用。国内外关于物理改性方法对淀粉结构与性质影响机理的研究也有很多,但缺乏从分子结构角度解析淀粉性质的变化规律且研究结果存在一些分歧。因此,本文对目前几种常见的热加工技术及其对淀粉结构与性质的影响做了归纳与总结,以期能为特定需求淀粉的生产研发提供一定的理论依据。

1 湿热改性淀粉

湿热处理指将淀粉颗粒加热到高于其玻璃化转变温度一段特定的时间(1~24 h),被认为是一种水热过程,该过程在相对较低的水分(<35%)和较高的加热温度(80~140 °C)条件下进行^[3-5]。

湿热改性淀粉的处理条件见表 1。

表 1 湿热改性淀粉的处理条件
Table 1 Treatment conditions of heat-moisture modified starch

淀粉来源	温度/°C	时间/h	水分/%	参考文献
	110、130、150	1、5、9	20、25、30	[6]
马铃薯	90~130	24	17~26	[7]
	100	10	30	[8]
大米,玉米,马铃薯	100	16	25	[9]
刀豆	100	16	20、25、30	[10]
玉米	120	24	30	[11]

1.1 湿热处理对淀粉结构的影响

高温低水分的湿热处理使淀粉链和螺旋结构的流动性提高,从而导致淀粉颗粒的结晶区和无定形区发生变化^[5]。湿热处理可以破坏淀粉中最不稳定的结构并改变高度螺旋结构和颗粒中的微晶结构。结晶区变化包括 B 型结晶堆积结构部分或完全转化为 A 型结构,破坏马铃薯淀粉颗粒内的 V 型结构,单链直链淀粉链结构和天然微晶的双螺旋排列,破坏片层结构堆叠,以及重新定向破坏的淀粉链和/或螺旋结^[6-7]。非晶区变化包括破坏无定形区的螺旋结构,形成新的有序结构和/或微晶,建立和/或改善直链淀粉-脂质复合物,非晶态直链淀粉链向为 V 型结构的过渡和转变^[8]。湿热处理还会导致淀粉链分子降解,如图 1 所示,Jiranuntakul 等^[9]还发现湿热处理的温度为 120 °C 或更高时,更有利于淀粉的热降解,不仅使 α ,1-4 糖苷键断裂,而且会导致 α ,1-6 糖苷键断裂。

1.2 湿热处理对淀粉理化特性的影响

湿热处理会引起一些淀粉颗粒形貌的变化包括颗粒大小的改变,表面的开裂,颗粒中心的空化,颗粒中心和/或外围的双折射的降低,颗粒的表面压痕或部分内部塌陷以及颗粒的部分糊化或团聚^[12]。相比天然淀粉,湿热改性淀粉的糊化温度(起始温度,峰值温度和终止温度)更高和糊化温度范围更大,这归因于颗粒无定形区内的淀粉聚合物链和/或淀粉-脂质复合物之间的缔合增

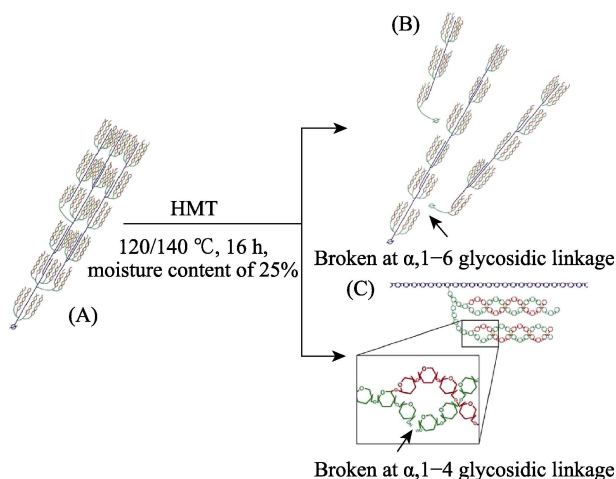


图 1 湿热改性后支链淀粉分子结构被破坏的示意图^[9]。

(A) 未处理淀粉的簇结构；(B) 湿热改性淀粉的簇结构；
(C) 湿热改性淀粉的放大图

Fig.1 Schematic representation of the amylopectin structure disrupted by HMT^[9]. (A) the cluster model of untreated starch; (B) the cluster model of HMT starch; (C) expanded view of HMT starch

加，导致无定形区内的淀粉链迁移率降低，从而导致微晶熔融温度升高^[9-10]。大多数研究发现湿热处理后的淀粉糊化焓，膨胀力和直链淀粉浸出率降低，降低程度随着水分含量和温度增加而增加。湿热改性淀粉表现出较低的峰值黏度，峰谷黏度和崩解值，而且湿热处理改善了淀粉的热稳定性和剪切稳定性^[8-9]。湿热改性的淀粉对酶降解的敏感性可能升高，降低或保持不变，这取决于淀粉的植物来源和改性条件（温度和水分含量）^[3]。大多数研究表明，湿热处理淀粉后的抗性淀粉含量会增加^[13]。

2 韧化改性淀粉

韧化也属于水热处理，是一种通过将淀粉颗粒在过量水（ $\geq 40\%$ ）中在玻璃化温度和糊化温度之间加热特定时间使淀粉发生变化的方法^[14]。韧化改性淀粉的处理条件见表 2。

表 2 韧化改性淀粉的处理条件

Table 2 Treatment conditions of annealing modified starch

淀粉来源	温度/°C	时间/h	水分/%	参考文献
刀豆	50	48	过量	[10]
马铃薯	48~58	24	1:3 (w/w)	[15]
绿豆	45~60	1、6、24	过量	[16]
豌豆	45	24、72	1:2 (w/w)	[17]
玉米	40、50、60	24	1:3 (w/w)	[18]
玉米、豌豆、小扁豆	49~57	24	过量	[11]

注：w/w：（淀粉：水）。

2.1 韧化对淀粉结构特性的影响

在分子水平上，韧化被认为可以增强颗粒中双螺旋链段的迁移率（由于水的增塑作用），有利于改善双螺旋在片层中的排列以及现有微晶的生长。韧化处理温度通常不会导致天然淀粉链断裂，可能会破坏最不稳定的结构，从而允许随后的淀粉链重结晶或重组^[19]。韧化还可修复淀粉微晶内的天然缺陷（未卷曲或未展开的螺旋末端），从而延长或扩展现有的双螺旋链段^[15]。韧化后的淀粉晶体表面稳定性提高，这是由于晶体边界处构象应变链片段的松弛所致。除了对晶体区的显著影响外，韧化过程还促进了具有颗粒无定形区的淀粉链的优先水合，迁移和结构重排，从而导致玻璃化温度升高和颗粒无定形区的刚性增加。因此，韧化改变淀粉的物理行为和性能是颗粒的结晶区和无定形区内发生的复合变化的反映^[16]。

2.2 韧化对淀粉理化特性的影响

多数研究指出，韧化后淀粉颗粒的外部颗粒结构或天然双折射模式几乎没有明显的可见变化，但一些研究者发现颗粒中心的双折射降低、颗粒的团聚、颗粒大小的增加或减少、颗粒表面的粗糙度增加、表面压痕或裂纹等现象^[17]。一般情况下，韧化处理会增加淀粉的糊化温度，而糊化焓一般不变或略有增加，膨胀力、溶解度、直链淀粉浸出率、峰值黏度和崩解值会降低^[18]。由于颗粒内引起的分子变化，韧化淀粉通常具有更强的热糊和剪切稳定性，韧化淀粉的凝胶具有更高的硬度。由于淀粉来源和韧化方法的不同，韧化淀粉对酶的敏感性不同。韧化淀粉中抗性淀粉含量可能会略有下降，抗性淀粉会转化为快速消化淀粉和慢速消化淀粉^[16]。

3 预糊化淀粉

预糊化淀粉由完全被破坏的颗粒组成，通常可溶于室温的水中。常见的预糊化淀粉制备方法包括滚筒加工技术和挤压加工技术。滚筒加工技术是将淀粉浆料加到蒸汽加热的滚筒上，在反复接触蒸汽加热辊的间隙中使淀粉迅速糊化并干燥，再刮下干膜并研磨成粉末，而挤压加工技术使用的是挤出机^[20]。两种方法得到的预糊化淀粉都必须研磨成所需的筛目大小，碾磨过程会导致

淀粉聚合物分子碎裂。也有报道淀粉用过热蒸汽处理得到预糊化淀粉^[21]。

3.1 预糊化对淀粉结构特性的影响

预糊化涉及多个同时发生的过程,例如,水在淀粉颗粒内的扩散和限制性膨胀,双折射现象消失,结晶度降低,吸热相变以及水分子的弛豫时间减少。在预糊化过程中也会发生解聚,小麦淀粉的直链淀粉和支链淀粉的分子量在滚筒加工过程中分别降低了 1.1 和 2.6 倍,在挤压过程中分别降低了 1.5 和 15 倍,挤出机中的高剪切力会导致更多的解聚,尤其是支链淀粉的解聚^[22]。

3.2 预糊化对淀粉理化特性的影响

由于预糊化淀粉是预先烹饪的,因此会迅速水合,无需烹饪即可使用,产品可分散在水或牛奶中后会产生光滑的糊状物,并用于干混合物(例如速溶布丁)中^[23]。添加预糊化淀粉有利于糯米粉形成凝胶,能够增强其凝胶结构的稳定性^[24]。郭玉等^[25]对羟丙基木薯淀粉的预糊化工艺进行了优化,发现制得的预糊化羟丙基木薯淀粉具有较好的冻融稳定性,并且能够明显改善冷冻面条的抗冻性,可以防止面条在冷冻过程中断裂。

4 颗粒状冷水可溶淀粉

颗粒状冷水可溶淀粉由颗粒完整但已糊化的淀粉组成。由于这些颗粒失去了结晶顺序,因此添加到室温的水中时会溶胀并形成糊状物。颗粒状冷水可溶淀粉可以通过三种常用方法制得^[26-27]:(a) 其中将淀粉在 75%~90% 的乙醇中加热至 150~175 °C 持续 0.5~2.0 h;(b) 将淀粉浆液喷雾干燥,快速加热干燥制备颗粒状冷水可溶淀粉,可以通过控制液滴大小,浆液浓度来生产不同尺寸的颗粒;(c) 淀粉在 25~35 °C 下用碱性乙醇水溶液处理,使颗粒糊化而不会崩解,可通过温度,时间及所用碱和醇的浓度来调节产物的性质。除了以上三种方法,研究人员还通过球磨法生产了颗粒状冷水可溶淀粉^[28]。

4.1 颗粒状冷水可溶淀粉的结构特性

颗粒状冷水可溶淀粉的支链淀粉分子会降解,脂质含量大大降低,颗粒表现出双折射,有序的微晶结构会破坏。如图 2 所示, Jane 等^[29]制

备的颗粒状冷水可溶玉米和小麦淀粉的晶型为 V 型,当淀粉在乙醇水溶液中加热到足够高的温度时,其天然支链淀粉的双螺旋会转化为单螺旋,单螺旋的直链淀粉和支链淀粉链段也会与乙醇形成 V-络合物,而淀粉颗粒由于直链淀粉和支链淀粉分子的缠结而保持完整。在含乙醇的强碱性溶液中制备颗粒状冷水可溶淀粉,一些淀粉羟基被离子化,这些负电荷之间的排斥会导致颗粒膨胀,扭曲并打开结晶区域,最终双螺旋结构被破坏,中和后与乙醇形成相同的单螺旋 V-络合物。

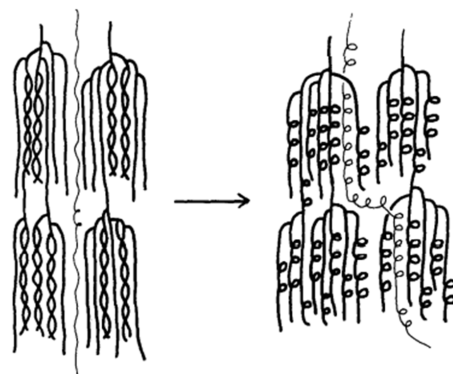


图 2 A 型淀粉颗粒向 V 型淀粉颗粒转化示意图^[29]

Fig.2 Conversion diagram of an A-type starch granule to a V-type granule^[29]

4.2 颗粒状冷水可溶淀粉的淀粉理化特性

相比于天然淀粉,颗粒状冷水可溶淀粉的溶解度增大,直链淀粉会略有降低,其悬浮液的储能模量,损耗模量和粘度增大,损耗正切角减小^[30]。颗粒状冷水可溶淀粉迅速水合,无需加热即可产生蒸煮淀粉的功能特性。通过快速搅拌将颗粒状冷水可溶淀粉分散在蔗糖或葡萄糖浆中时,然后将分散液倒入模具中凝固成糖脂状凝胶。在颗粒状冷水可溶淀粉的制备过程中,一些分子间的氢键与淀粉颗粒作用力被破坏。当这些颗粒置于水中时,迅速发生水化和溶胀,同时淀粉回生发生不溶导致淀粉分散液质量变差,然而,当将处理过的颗粒分散在糖溶液中时,回生度最小。在未加热的水中溶胀的能力也可用于制作甜点,冷却后形成硬糖状的产品^[27]。

5 微波改性淀粉

微波辐射只会产生热效应,当可极化分子(例如水分子)和/或离子受到振荡微波的作用时,在

电磁场 (300~300 000 MHz) 作用下会发生加热, 是由于分子旋转, 摩擦和碰撞而产生热能。微波的功率和频率, 淀粉的水分含量以及微波时间是影响微波改性淀粉的主要因素^[31]。

5.1 微波对淀粉结构特性的影响

微波会改变淀粉的晶型, 当微波 B 型淀粉时, 晶型从 B 型变为 A + B 型, 双螺旋含量会增加。Szepes 等^[32]用微波辐射了未添加水分的玉米和马铃薯淀粉 15 min, 发现玉米淀粉的微晶含量从 85% 降低到 30%, 马铃薯淀粉的结晶度增加且晶型由 B 型转变为 A 型, 马铃薯淀粉的保水能力和膨胀力增加, 对玉米淀粉的影响不明显。

5.2 微波对淀粉理化特性的影响

微波辐射对淀粉的影响与淀粉种类、水分含量以及微波功率等因素有关。这种影响会改变淀粉的溶解度、膨胀度和冻融稳定性等。微波辐射会降低淀粉的溶解度和膨胀度。Luo 等^[33]报道了微波处理玉米和蜡质玉米淀粉 (30%) 水分导致淀粉的溶解度、膨胀度、冻融稳定性都降低。Lee 等^[34]将蜡质、普通和高直链玉米淀粉的水分含量调整为 10%~35% 并使用微波辐照, 糊化温度增加, 峰值粘度和崩解值降低。微波处理后, 非蜡质淀粉的峰值、峰谷和最终粘度增加, 而蜡质淀粉的峰值、峰谷和最终粘度降低, 膨胀力增加, 溶解度减少, 初始糊化温度和峰值糊化温度增加, 糊化焓降低。此外, 微波改性淀粉对淀粉酶的敏感性降低, 其抗性淀粉和慢消化淀粉的含量增加。

6 干热改性淀粉

干热改性淀粉一般情况下分为两个过程, 首先是将淀粉进行干燥处理, 控制水分, 然后把干燥后的淀粉在一定的温度下热处理一段时间, 从而变性淀粉。干热法是指将淀粉水分控制在 10% 以下, 在 100~200 °C 之间进行热处理, 该处理会使淀粉性质发生变化^[35]。

6.1 干热对淀粉结构特性的影响

干热处理青稞淀粉 (100 °C, 2 h) 后, 淀粉有序化程度和结晶度的增加以及淀粉分子断链后的重排引起的。当淀粉分子断链后其分子摩尔质量低于 2×10^7 g/mol 时, 淀粉的螺旋结构含量增加,

结晶度提高, 结晶片层更加有序^[35]。汝远等^[36]认为当干热处理温度高于糊化温度时, 部分支链淀粉双螺旋结构开始解旋。王德培等^[37]研究了 40 °C 长时间干热处理绿豆淀粉和豌豆淀粉, 发现两种淀粉的可溶性淀粉转化成不溶性的直链淀粉, 而淀粉总量保持不变。这可能是由于分子振动增加了氢键的结合, 出现了高分子直链淀粉聚集体, 从而使得淀粉表现出不溶性。

6.2 干热对淀粉理化特性的影响

通常, 干热处理后淀粉的颗粒形态与原淀粉相比无明显差异, 但是有研究发现在长时间处理下 (130 °C, 18 h), 糯小麦淀粉颗粒的表面出现孔洞, 并且表面的孔洞随处理时间的增长而加深^[38]。Sun 等^[39]报道了小米淀粉分别在 130 °C 下干热 2~4 h 后糊化初始和峰值温度明显升高, 吸热焓降低。而汝远等^[36]报道当干热温度高于糊化温度而低于 150 °C 时, 玉米淀粉的溶解度、粘度、糊化温度均降低。González 等^[40]在不同的温度 (150、175 和 200 °C) 和不同水分含量 (12%、16% 和 20%) 的流化床中加热苋菜淀粉 18 s, 发现淀粉的结晶度、糊化焓、峰值黏度和最终黏度随温度和水分含量的增加而降低, 而溶解度和膨胀力随干热温度和淀粉水分含量的增加而增加。流化床加热处理后, 淀粉的糊化温度降低且储存模量随着温度和水分含量的增加而减小。干热改性淀粉在较低的温度和水分含量下, 抗性淀粉含量显著增加, 而在较高温度和水分含量下显著降低。

7 展望

我国是淀粉生产大国, 淀粉资源丰富, 改性淀粉在我国发展迅速, 物理改性仅仅涉及到物理场的作用, 不会对人体健康造成威胁, 也不存在化学试剂对环境的污染问题, 并且操作简单快速, 已经受到了越来越多研究者的关注。对于物理改性淀粉研究者们要做的工作还有很多, 将淀粉来源、物理方法、加工条件等多种因素结合起来, 系统深入地研究这些因素对淀粉理化性质的影响及其机理, 明晰处理条件-结构-性质之间的相互影响关系, 使热处理这种绿色加工方式真正应用于淀粉深加工产业。尝试多种热加工方法联用, 如湿热和微波技术联用, 达到一加一大于二的改

性效果,降低热改性淀粉的加工成本,使其实现工业化生产。热加工改性淀粉可根据具体的性质特点应用于食品领域,如湿热改性淀粉热和剪切力的稳定性高、老化程度和膨胀度溶出率低,在罐头、面条及冷冻食品的生产加工中应用前景广阔;预糊化淀粉大多被用作增稠和保持产品形态,也可以改善产品质量及内部组织结构;颗粒状冷水可溶淀粉在增稠、保水、保形和乳化方面均有良好的性能,在生产中可快速使用,适合作为食品生产的配料。除此之外,在医药、化妆、饲料等领域都可以应用热加工改性淀粉作为添加剂。

参考文献:

- [1] 赵丹,陈宁,孙明明,等.物理改性淀粉的研究进展[J].广州化工,2015,43(4):9-11.
ZHAO D, CHEN N, SUN M, et al. Research progress of physical modified starch[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015, 43(4): 9-11.
- [2] 孙亚东,陈启凤,吕闪闪,等.淀粉改性的研究进展[J].材料导报,2016,30(21):68-74.
SUN Y, CHEN Q, LU S, et al. Recent progress in modification of starch[J]. Materials Review, 2016, 30(21): 68-74.
- [3] HOOVER R. The impact of heat-moisture treatment on molecular structures and properties of starches isolated from different botanical sources[J]. Critical reviews in food science and nutrition, 2010, 50(9): 835-847.
- [4] 崔添玉,辛嘉英,王广交,等.物理法改性淀粉的研究进展[J].粮食与油脂,2020,33(2):17-19.
CUI T, XIN J, WANG G J, et al. Research progress on physical modification of starch[J]. Cereals & Oils, 2020, 33(2): 17-19.
- [5] 廖卢艳,吴卫国.湿热改性淀粉研究进展[J].食品与机械,2015,169(5):266-269.
LIAO L, WU W. Research progress in starch modification by heat moisture treatment[J]. Food and Machinery, 2015, 169(5): 266-269.
- [6] LEE C J, KIM Y, CHOI S J, et al. Slowly digestible starch from heat-moisture treated waxy potato starch: Preparation, structural characteristics, and glucose response in mice[J]. Food Chemistry, 2012, 133(4): 1222-1229.
- [7] VERMEYLEN R, GODERIS B, DELCOUR J A. An X-ray study of hydrothermally treated potato starch[J]. Carbohydrate polymers, 2006, 64(2): 364-375.
- [8] GUNARATNE A, HOOVER R. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches[J]. Carbohydrate polymers, 2002, 49(4): 425-437.
- [9] JIRANUNTAKUL W, PUTTANLEK C, RUNGSARDTHONG V, et al. Amylopectin structure of heat-moisture treated starches[J]. Starch - Stärke, 2012, 64(6), 470-480.
- [10] OLU-OWOLABI B I, AFOLABI T A, ADEBOWALE K O. Pasting, thermal, hydration, and functional properties of annealed and heat-moisture treated starch of sword bean (*Canavalia gladiata*)[J]. International Journal of Food Properties, 2011, 14(1): 157-174.
- [11] CHUNG H J, LIU Q, HOOVER R. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 75(3): 436-447.
- [12] 罗志刚,高群玉.湿热处理改性淀粉的研究进展[J].中国粮油学报,2006,21(1):47-50.
LUO Z, GAO Q. Research progress in starch modification by heat-moisture treatment[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2006, 21(1): 47-50.
- [13] AMBIGAIPALAN P, HOOVER R, DONNER E, et al. Starch chain interactions within the amorphous and crystalline domains of pulse starches during heat-moisture treatment at different temperatures and their impact on physicochemical properties[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 175-184.
- [14] 伍婧,李宗军,李珂,等.糊化处理对淀粉品质特性的影响及应用研究进展[J].中国粮油学报,2015,30(9):139-146.
WU J, LI Z, LI K, et al. Review of the effects of annealing on starch quality and its application[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(9): 139-146.
- [15] GOMAND S V, LAMBERTS L, GOMMES C J, et al. Molecular and morphological aspects of annealing-induced stabilization of starch crystallites[J]. Biomacromolecules, 2012, 13(5): 1361-1370.
- [16] CHUNG K M, MOON T W, CHUN J K. Influence of annealing on gel properties of mung bean starch[J]. Cereal chemistry, 2000, 77(5): 567-571.
- [17] WANG S, JIN F, YU J. Pea starch annealing: New insights[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(12): 3564-3575.
- [18] 杜双奎,王华,赵佳,等.糊化处理对不同玉米淀粉理化特性的影响[J].食品科学,2012(17):78-81.
DU S k, WANG H, ZHAO J, et al. Effect of annealing on physico-chemical characteristics of different maize starches[J]. Food Science, 2012(17): 78-81.
- [19] JAYAKODY L, HOOVER R. Effect of annealing on the molecular structure and physicochemical properties of starches from different botanical origins-A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2008, 74(3): 691-703.
- [20] 朱晓康.预糊化淀粉[J].粮食与油脂,1993,2:13-18.
ZHU X K. Pregelatinized starch [J]. Cereals & Oils, 1993, 2: 13-18.
- [21] BAHRANI S A, LOISEL C, MAACHE-REZZOUG Z, et al. Rheological and viscoelastic properties of corn starch suspension modified by hydrothermal process: Impacts of process intensification[J]. Chemical Engineering and Processing: Process

- Intensification, 2013, 64: 10-16.
- [22] DOUBLIER J L, COLONNA P, MERCIER C. Extrusion cooking and drum drying of wheat starch. II. Rheological characterization of starch pastes[J]. Cereal Chemistry, 1986, 63(3): 240-246.
- [23] 洪雁, 顾正彪. 变性淀粉在食品工业中的应用[J]. 食品科技, 2002, 11:44-45.
HONG Y, GU Z B. Application of modified starches in food industries[J]. Food Science and Technology, 2002, 11: 44-45.
- [24] 王宏伟, 王新天, 肖乃勇, 等. 预糊化淀粉对糯米粉糊化、流变性能及微观结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(4): 57-62.
WANG H W, WANG X T, XIAO N Y, et al. Effect of pre-gelatinized starch on pasting, rheological properties and microstructures of glutinous[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association 2019, 34(4): 57-62.
- [25] 郭玉, 吕莹果, 陈洁, 等. 预糊化羟丙基淀粉的制备及其在冷冻面条中的应用[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2013, 34(1): 41-46.
GUO Y, LV Y, CHEN J, et al. Preparation of pre-gelatinized hydroxypropyl starch and its application in frozen noodles[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 34(1): 41-46.
- [26] 高群玉, 蔡丽明, 陈惠音, 等. 颗粒状冷水可溶淀粉在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2007, 28(2):154-157.
GAO Q, CAI L, CHEN H, et al. Application of granular cold-water-soluble starch food industry[J]. Food Research and Development, 2007, 28(2): 154-157.
- [27] 孙平, 钱娟娟, 杨俊霞, 等. 冷溶玉米淀粉的制备及其微观结构与物性的变化[J]. 食品科学, 2009, 3: 129-132.
SUN P, QIAN J, YANG J, et al. Preparation of cold-water soluble corn starch and changes of its microstructure and physical properties [J]. Food Science, 2009, 3: 129-132.
- [28] 黄祖强, 胡华宇, 童张法, 等. 机械活化法制备冷水可溶性玉米淀粉的工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2005, 31(12): 1-3.
HUANG Z, HU H, TONG Z, et al. Study on preparing technology of cold-water-soluble maize starch by mechanical activation[J]. Food and Fermentation Industries, 2005, 31(12): 1-3.
- [29] JANE J, CRAIG S A S, SEIB P A, et al. Characterization of granular cold water-soluble starch[J]. Starch-Stärke, 1986, 38(8): 258-263.
- [30] SINGH J, SINGH N. Studies on the morphological and rheological properties of granular cold-water soluble corn and potato starches[J]. Food hydrocolloids, 2003, 17(1): 63-72.
- [31] 闫溢哲, 冯琳琳, 史苗苗, 等. 淀粉物理改性技术研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(3): 241-245.
YAN Y, FENG L, SHI M, et al. Progress on physical modification of starch[J]. The Food Industry, 2020, 41(3): 241-245.
- [32] SZEPE A, HASZNOS-NEZDEI M, KOVÁCS J, et al. Microwave processing of natural biopolymers—studies on the properties of different starches[J]. International journal of pharmaceutics, 2005, 302(1-2): 166-171.
- [33] LUO Z, HE X, FU X, et al. Effect of microwave radiation on the physicochemical properties of normal maize, waxy maize and amylo maize V Starches[J]. Starch - Stärke, 2010, 58(9): 468-474.
- [34] LEE S J, SANDHU K S, LIM S T. Effect of microwave irradiation on crystallinity and pasting viscosity of corn starches different in amylose content[J]. Food Science and Biotechnology, 2007, 16(5): 832-835.
- [35] 卞华伟, 郑波, 陈玲, 等. 干热处理对青稞淀粉多尺度结构和理化性质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(7): 93-101.
BIAN H, ZHENG B, CHEN L, et al. Multi-scale structure and physicochemical properties of highland barley starch following dry heat Treatment[J]. Food Science, 2020, 41(7): 93-101.
- [36] 汝远, 王蕾, 周君, 等. 干热处理对玉米淀粉性质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 138-141.
RU Y, WANG L, ZHOU J, et al. Effect of dry heating on properties of corn starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 138-141.
- [37] 王德培, 潘慧生. 干热处理对绿豆淀粉和豌豆淀粉化学组成的影响及其与粉丝品质的关系[J]. 浙江农业大学学报, 1997, 23(S): 49-53.
WANG D, PAN H. Effect of dry-air treatment on chemical compositions of mung bean starch and pea starch and eating quality of starch silk[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 1997, 23(S): 49-53.
- [38] ZHANG B, ZHANG Q, WU H, et al. The influence of repeated versus continuous dry-heating on the performance of wheat starch with different amylose content[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 136: 110380.
- [39] SUN Q, GONG M, LI Y, et al. Effect of dry heat treatment on the physicochemical properties and structure of proso millet flour and starch [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 110: 128-134.
- [40] GONZÁLEZ R, CARRARA C, TOSI E, et al. Amaranth starch-rich fraction properties modified by extrusion and fluidized bed heating[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(1): 136-143. 完

备注：本文的彩色图表可从本刊官网（<http://lspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>）、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。