

小麦淀粉的研究现状

项丰娟, 苏磊, 张秀南, 秦仁炳, 曾洁, 李光磊*

(河南科技学院 食品学院, 河南 新乡 453003)

摘要:小麦淀粉是小麦中的主要成分和重要储能物质,其性质直接影响小麦资源的开发与利用,近年来,很多学者对小麦淀粉的各个方面都在进行深入的研究。该文概述小麦淀粉的结构特点,综述小麦淀粉的糊化、回生、冻融稳定性、凝胶性等功能特性,以及小麦淀粉的应用,并针对小麦淀粉的发展趋势进行前景展望,以期小麦淀粉的进一步研究利用提供参考,并促进其在食品及非食品领域的开发利用。

关键词:小麦淀粉;提取;结构;性质;应用

Research Status of Wheat Starch

XIANG Feng-juan, SU Lei, ZHANG Xiu-nan, QIN Ren-bing, ZENG Jie, LI Guang-lei*

(School of Food Science, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, Henan, China)

Abstract: Wheat starch is the main component and important energy storage substance in wheat. The development and utilization of wheat resources are affected directly by its properties. In recent years, numerous scholars have conducted in-depth studies on various aspects of wheat starch. In this paper, the structural characteristics of wheat starch; the functional properties of wheat starch, such as gelatinization, retrogradation, freeze-thaw stability, gelatability; and its application were summarized. The development trend of wheat starch was prospected to provide a reference for further research and utilization of wheat starch and to promote its development and utilization in food and non-food fields.

Key words: wheat starch; extraction; structure; properties; application

引文格式:

项丰娟, 苏磊, 张秀南, 等. 小麦淀粉的研究现状[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 212-219.

XIANG Fengjuan, SU Lei, ZHANG Xiunan, et al. Research Status of Wheat Starch[J]. Food Research and Development, 2021, 42(16): 212-219.

小麦在我国至少有四千年的种植历史,其种植范围相当广泛,仅次于玉米,位居世界第二^[1-3],在世界的粮食作物中占有非常重要的地位。小麦作为日常主食,可以做成面条、馒头、烙饼等多种形式的食物,是人们日常饮食中不可或缺的一部分^[4]。小麦籽粒中含有蛋白质、脂质、粗纤维和淀粉等营养物质,其中淀粉含量最为丰富,是人体营养和能量的主要来源。小麦淀粉是一种天然的高分子多糖化合物,在小麦籽粒中总淀粉含量约占65%,由直链淀粉和支链淀粉组成,在加工食品中还可用作增稠剂、稳定剂和脂肪替代品等^[5],同时,还广泛应用于纺织、造纸、化妆品等^[6]工业中,可以生产胶黏剂和增稠剂等很多工业所需产品,

因此,小麦淀粉在整个小麦加工行业是非常重要的。小麦淀粉一直是学者不断深入研究的主题,产生了大量的研究成果,本文从小麦淀粉的结构、性质和应用等方面进行综述,以期小麦淀粉的研究利用提供科学依据。

1 小麦淀粉结构

1.1 颗粒形态

小麦淀粉颗粒主要分为“A”型和“B”型,“A”型淀粉呈扁豆型,其直径为20 μm~45 μm,“B”型淀粉呈球形,其直径小于10 μm^[7-8],“A”型淀粉颗粒占淀粉总质量的70%~80%,而“B”型淀粉不到10%^[9]。通过扫描

作者简介:项丰娟(1989—),女(汉),博士研究生,研究方向:食品营养与安全。

*通信作者:李光磊(1970—),男,教授,博士,研究方向:淀粉科学。

电镜和偏光显微镜观察小麦淀粉的颗粒形态,结果见图1。

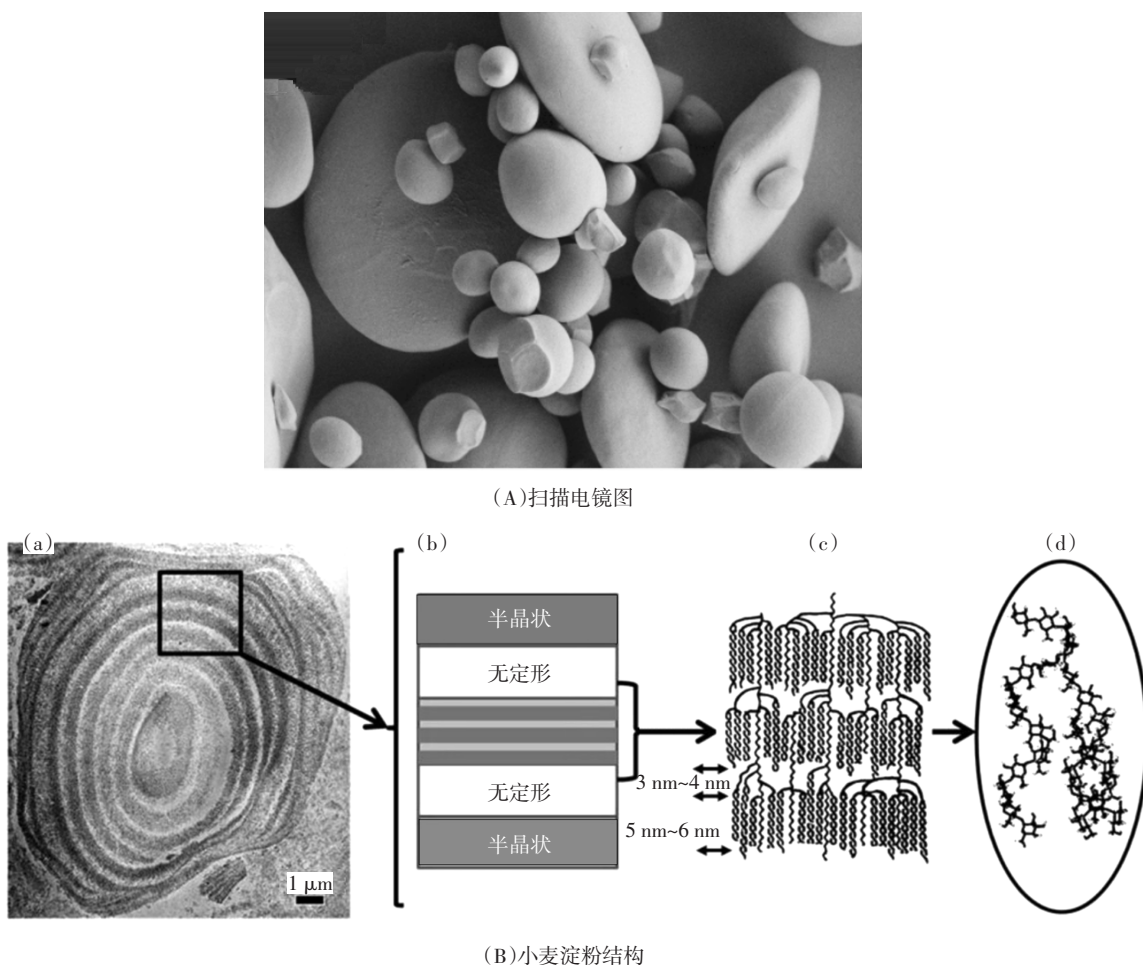


图1 小麦淀粉的结构图

Fig. 1 Structure diagram of wheat starch

通过扫描电镜发现大多数小麦淀粉颗粒形态呈圆形或者椭圆形,少数为无规则形状(图1A)。经过酸水解或者酶水解的小麦淀粉颗粒中支链淀粉到生长环的结构见图1B。淀粉颗粒具有非常复杂的分级结构。从大到小,首先是完整的淀粉颗粒,然后是交替的晶体生长环和无定形生长环结构。晶体生长环的厚度在400 nm~500 nm之间,由交替排列的晶体片层和无定形片层构成;淀粉中一个交替的晶体片层和无定形片层厚度在9 nm~11 nm之间,其中晶体片层的厚度为5 nm~6 nm,主要由淀粉分子中有序折叠的双螺旋结构有序堆积构成,而无定形片层厚度为3 nm~4 nm,主要由支链淀粉的分支点和没有有序堆积的双螺旋结构构成^[10]。淀粉无定形区域主要是由直链淀粉和没有形成双螺旋结构的支链淀粉组成,位于淀粉颗粒的核心和外转区域。PÉREZ等^[10]和Tang等^[11]研究淀粉颗粒发现由结晶区片层和无定形片层组成的直径在20 nm~

400 nm之间的近似球状的结构,又被称为“小体结构”,“小体结构”的尺寸也是影响淀粉消化性的重要因素。聂丹^[12]用扫描电镜观察几种淀粉,对比发现,小麦淀粉颗粒呈扁平圆状,表面较光滑,较大的颗粒中心凹陷,较小的颗粒较圆润饱满,扁平面宽度20 μm~38 μm,厚度5 μm~15 μm。郑学玲等^[13]对比研究了青稞淀粉和小麦淀粉的理化性质,发现小麦淀粉的颗粒大小和形状分布没有青稞淀粉的均匀,青稞淀粉颗粒的平均粒径大于小麦淀粉,为18.13 μm。小麦淀粉的颗粒形态对小麦淀粉的功能性质有一定的影响,因此颗粒形态一直是小麦淀粉研究领域必不可少的分析指标。

1.2 化学组成

在成熟的小麦籽粒中,淀粉约占65%,蛋白质占10%~15%,水分占13%~15%,油脂占2%,粗纤维占3%以及灰分占1%^[14]。小麦淀粉是由直链淀粉和支链淀粉组成的高分子多糖聚合物,不同品种小麦淀粉其

直链淀粉含量也不同,秦中庆等^[15]测定了22个小麦品种,发现直链淀粉含量最低的小麦品种是豫麦47(即丰优3号)为16.3%,而陕优225-2的直链淀粉含量最高为70.7%。根据X射线衍射特征峰的特征可以将小麦淀粉分为A型、B型和C型晶体类型,C型淀粉是A型和B型淀粉的混合物。小麦淀粉具有相对较多短链,其重均链长为23~29,A型晶体是单斜晶胞结构,每个晶胞周围由4个水分子,其结构相对比较紧凑,B型淀粉是六边形晶胞结构,每个晶胞周围堆积这36个水分子,其结构相对松散^[16]。

2 小麦淀粉性质

2.1 糊化特性

淀粉不溶于冷水,当被加热至一定温度时,淀粉颗粒会吸水膨胀,然后水分子会进入淀粉颗粒的内部,与部分淀粉分子以氢键的形式结合,首先破坏淀粉的无定形区,进而对淀粉的结晶区产生作用,使淀粉分子内部结构被打乱,宏观表现为淀粉由悬浮液逐渐形成一种半透明状的黏稠液体,该过程称为淀粉的糊化^[17]。糊化是淀粉重要的性质,淀粉糊化的峰值黏度、回生值、破损值对淀粉的应用有决定性作用^[18],经糊化处理后的淀粉可应用于速冻食品、凝胶、可食用涂层等。甘淑珍等^[19]研究小麦淀粉的影响因素及黏度稳定性,结果表明在一定的条件下小麦淀粉的糊化可经历黏度的上升、下降和回升过程,反映了淀粉晶体熔融、颗粒的溶胀、破裂和直链淀粉的有序化。

张正茂等^[20]研究了8种不同来源淀粉的糊化特性,研究表明几种淀粉相对比,小麦淀粉的糊化温度最低,为62.6℃。郑学玲等^[13]研究发现与青稞淀粉相比,小麦淀粉不易糊化,且小麦淀粉的峰值黏度、谷值黏度都大于青稞淀粉,但衰减值小于青稞淀粉。吕元娣等^[21]研究发现青稞淀粉的成糊温度和峰值黏度均介于小麦淀粉和荞麦淀粉之间,其糊化易于小麦淀粉而难于荞麦淀粉。赵凯等^[22]研究小麦淀粉老化动力学及玻璃化转变温度,发现分离后的小麦B淀粉(用沉降法将淀粉与水制成悬浮液,静置1h收集的沉淀为A淀粉,静置20h收集的沉淀为B淀粉)的糊化峰值温度和糊化结束温度高于小麦总淀粉,而糊化起始温度低于小麦总淀粉和小麦A淀粉。范逸超等^[23]研究 γ -聚谷氨酸对小麦淀粉糊化及流变学特性的影响,表明随着 γ -聚谷氨酸添加量的增多,小麦淀粉的糊化温度升高,且添加量为0.7%时效果最好, γ -聚谷氨酸阻碍了淀粉的糊化,使淀粉的热糊稳定性提高。梁国香等^[24]研究在小麦淀粉中添加不同含量的小麦纤维,结果表明

在小麦淀粉中随着小麦纤维添加量的增加,小麦淀粉糊化温度呈下降趋势,黏度呈上升趋势。

2.2 回生特性

淀粉回生是指糊化淀粉分子由无序态向有序态转化的过程^[25],其实是糊化后的淀粉分子自动排列成序,形成高度致密的、结晶化的不溶性分子微束,过程包括直链分子螺旋结构的形成及其堆积、支链淀粉外支链间双螺旋结构的形成与双螺旋之间的有序堆积^[26]。加工淀粉对酶消化的敏感性主要取决于糊化过程中淀粉结构的破坏程度和随后的回生过程中形成的聚集体^[27]。小麦淀粉的回生通常被认为具有不好的影响,因为它主要会导致含小麦淀粉含量高的食品老化,这可能使食品的保质期缩短,影响小麦淀粉类食品的感官评定和储存品质,然而,就食品的质构和营养特性而言,淀粉回生对于某些淀粉类食品是可取的,例如早餐谷物、米粉的生产等,因此,淀粉的回生也是学者们研究的重要方向。

牟汝华^[28]研究了水分含量和凝胶化温度对大米淀粉和小麦淀粉回生的影响,发现小麦淀粉和大米淀粉回生受水分含量的影响很显著,淀粉在水分子的作用下,凝胶化中的结构被破坏的更彻底,达到最高焓值所需的能量较少。对于存在残余晶体的情况,残余晶体越少,小麦淀粉和大米淀粉的回生行为越显著。当残余晶体完全消失时,表现为凝胶化温度越高,小麦淀粉和大米淀粉的回生焓值越高并且不同水分含量样品的最大焓值接近。King等^[29]从储能模量的角度评价了晶化对结构的影响,发现淀粉的回生速率取决于贮存温度(23℃和4℃)和淀粉的植物来源。张玉荣等^[30]研究发现中筋和高筋两种筋型的小麦淀粉的回生值与储藏时间呈现显著的相关性,即两种筋型的小麦淀粉在储藏80d后,其回生值总体呈现增加的趋势。Cieřla等^[31]在研究中发现,当淀粉糊的水分含量高时,辐照处理能够促进回生,当淀粉糊的水分含量低时,辐照处理能够抑制其回生。谢新华等^[32]研究了月桂酸对小麦淀粉凝胶回生特性的影响,发现月桂酸可以通过抑制直链淀粉分子重排成有序结构,延缓直链淀粉分子的重结晶,从而抑制淀粉的回生。邢燕等^[33]在小麦淀粉中添加木糖醇后,发现小麦淀粉糊化温度升高,峰值黏度随着木糖醇添加量的增加呈上升趋势,当添加15%~25%木糖醇时,小麦淀粉的衰减值、回生值均增加。徐进等^[34]用广角X射线衍射法(wide-angle X-ray diffraction method, WXR)和差式扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)研究极限糊精对小麦淀粉回生的影响, WXR)结果表明添加10%极限

糊精组分的小麦淀粉回生的相对结晶度小于原淀粉的相对结晶度,DSC结果表明添加了极限糊精组分可以降低小麦淀粉的回生焓值。王晨等^[35]研究阿魏酸对小麦淀粉理化特性的影响,快速黏度分析仪(rapid viscosity analyzer,RVA)结果表明添加阿魏酸后,小麦淀粉的峰值黏度、保持黏度和最终黏度降低,而崩解值增大,说明阿魏酸抑制了小麦淀粉的回生进程,并且扫描电镜也证明阿魏酸抑制了小麦淀粉的老化过程。Guo等^[36]研究小麦面筋蛋白中的谷蛋白对小麦淀粉回生的影响,研究发现直链淀粉在回生过程中可以通过氢键和二硫键与麦谷蛋白酪氨酸结合,当它们完全形成双螺旋结构,阻碍了小麦淀粉的直链-支链淀粉的短期回生,所以在淀粉中添加麦谷蛋白是延缓直链淀粉回生的较好方法。

2.3 冻融稳定性

小麦淀粉凝胶的冻融稳定性是影响淀粉基食品品质的一个重要因素,淀粉基食品在经历冷冻、冻融、再冷冻过程的处理运输过程中会使食品水分流失、表皮干裂、变硬等^[37],导致食品品质的劣变,这与淀粉凝胶的冻融稳定性有直接关系。冻融稳定性可以用来衡量淀粉承受冷冻和解冻过程引起的不良物理变化的能力^[38]。即冷冻食品在一些不同温度的环境条件下会反复冻融,影响食品的品质,所以提高食品的冻融稳定性是十分必要的。

贾春利等^[39]通过研究发现冻融过程能够显著地增加淀粉凝胶的析水率和可冻结水含量,严重地破坏淀粉凝胶超微结构、增加孔洞尺寸、减小孔洞均匀性,最后导致淀粉凝胶硬度明显增大,弹性明显减弱。张华等^[40]研究发现小麦淀粉凝胶随冻融次数的增加,其析水率、老化度及冰晶熔化焓都明显增加;同时冻融次数的增加严重破坏了淀粉凝胶的超微结构,使淀粉凝胶质构产生了明显的变化,即硬度、胶着性增大,弹性减小。谢新华等^[41]研究发现 γ -聚谷氨酸降低了小麦淀粉凝胶的结晶度,抑制了直链淀粉、支链淀粉的重结晶,防止冻融循环而导致淀粉凝胶的重结晶现象。添加 γ -聚谷氨酸明显改善了淀粉凝胶的微观结构,使其孔洞变小、更均匀、更紧密,缓解了冻融循环对其内部结构的破坏。并且 γ -聚谷氨酸的添加明显提高了小麦淀粉凝胶的冻融稳定性,且随添加量的增加,效果越明显,添加量(质量分数)为0.7%时,效果最好。代蕾等^[42]研究魔芋胶对小麦淀粉理化性质影响,结果表明添加魔芋胶后,小麦淀粉凝胶的冻融稳定性提高,硬度降低。谢新华等^[43]通过研究单硬脂酸甘油酯对小麦淀粉凝胶晶体结构、热力学特性及质构特性的影响,

发现单甘酯通过与淀粉形成复合物,可以提高小麦淀粉凝胶的冻融稳定性。

2.4 凝胶特性

淀粉糊化后,淀粉分子中的直链淀粉渗透出来,以双螺旋的形式相互缠绕形成三维网状结构,将充分糊化的淀粉颗粒包裹其中,此过程称为凝胶化^[44]。淀粉凝胶化作用使淀粉产品产生了只溶胀但不溶解的颗粒,从而影响淀粉产品的整体性能^[45]。许多食品利用了淀粉凝胶的性质,如粉丝、凉粉、粉皮等,这些食品的品质主要取决于淀粉的凝胶特性^[46]。

吴桂玲等^[47]研究脱脂和脱蛋白处理对小麦A、B淀粉理化性质的影响,结果表明脱脂脱蛋白处理使小麦淀粉的起始糊化温度、峰值温度、终止温度显著增大,凝胶化焓值无显著变化。Sun等^[48]研究发现天然小麦淀粉颗粒是球形结构,而糊化小麦淀粉凝胶中观察到许多小孔,其致密结构类似于蜂窝结构。Zhang等^[49]研究发现小麦淀粉与金丝雀籽淀粉相比,小麦淀粉凝胶具有更高的胶黏性和较低的凝聚力。

2.5 质构

小麦淀粉的质构特性间接反映食品的品质,如食品的口感、形态和货架期等,其对食品品质有重要的影响。

任顺成等^[50]通过研究芦丁和槲皮素对小麦淀粉凝胶质构特性的测定,发现分别添加芦丁和槲皮素的小麦淀粉,其硬度、黏性和弹性都显著降低,黏聚性显著增大。宋一诺等^[51]研究在小麦淀粉中添加月桂酸,结果表明与不添加月桂酸的小麦淀粉相比,其热糊黏度凝胶硬度和咀嚼性显著减小,最终黏度增大;并且随着月桂酸用量的增加,小麦淀粉的最终黏度逐渐增大,硬度和咀嚼性逐渐减小。Sun等^[48]研究发现小麦淀粉的硬度和咀嚼性随小麦纤维的增加而增加,黏聚性降低,弹性无明显变化。

2.6 透明度

在淀粉基食品加工和生产应用中,对淀粉糊的透明度有一定要求,淀粉糊透明度也是影响食品品质的一个重要因素,反映淀粉与水结合能力的强弱^[52],淀粉糊化后其分子重新排列相互缔合的程度是影响淀粉糊透明度的重要因素^[53],用透光率表示淀粉透明度的程度,淀粉透光率越大表示淀粉透明度越好^[54]。

侯蕾等^[55]研究不同种类淀粉(小麦淀粉、玉米淀粉、土豆淀粉、红薯淀粉和绿豆淀粉)理化性质比较,结果表明小麦淀粉的透明度最低,淀粉糊的黏度和热稳定性最好。张慧娟等^[56]研究碱法提取青稞淀粉的理化性质,结果表明在含量相同的情况下,小麦淀粉的透

光率比青稞淀粉的透光率小,说明小麦淀粉的透明度比青稞淀粉小。

2.7 溶解度和膨胀度

淀粉的溶解度和膨胀度与小麦淀粉中直链淀粉、支链淀粉、蛋白质、脂质等成分的含量和颗粒大小有一定的关系^[57-58]。溶解度可以体现淀粉颗粒与水分子的相互作用力的大小情况。

Šubarić等^[59]研究丁二酸与乙酸酐混合可制得糊化温度低、易回生、溶胀力和溶解度高的小麦淀粉。侯蕾等^[55]研究不同种类淀粉理化性质,结果表明不同种类淀粉的溶解度大小依次为红薯淀粉、土豆淀粉、绿豆淀粉、玉米淀粉、小麦淀粉,即红薯淀粉的溶解度最高,小麦淀粉的溶解度最低。李素云等^[60]研究不同冻藏方式对小麦淀粉功能性质的影响,结果表明随着冻藏时间的增加,淀粉的溶解度呈上升趋势,而冻融冻藏有相同的趋势,且溶解度上升的更明显。

3 小麦淀粉的应用

小麦淀粉的来源广泛、价格低廉,随着对小麦淀粉深加工的研究,小麦淀粉可以应用于多种行业,但是由于其自身的性质,在工业和某些食品行业还是无法满足需求,限制了小麦淀粉的加工及应用,所以在纺织、造纸、日用化工等行业使用的多是改性淀粉,改性后的小麦淀粉克服了原淀粉易回生、不耐强酸、强碱等缺点,所以改性的小麦淀粉也是增加其应用范围的重要手段。

王首旗等^[61]研究改性后的小麦淀粉用于纸张表面施胶的性能和可行性,并确定小麦淀粉氧化改性的最佳工艺条件:50 g 小麦淀粉与 450 mL 水溶液混匀,升温 55 ℃,保温 60 min,再加过硫酸铵 0.5 g,升温至 75 ℃,保温 60 min,升温至 95 ℃,保温 60 min,加 3.6 g 硫酸铝和 4 g 阳离子表面施胶剂搅拌均匀。杨金田等^[62]以小麦淀粉为原料,过硼酸钠为催化剂,过氧化尿素为氧化剂,聚丙烯酰胺为改性剂,钠基/钙基复合膨润土为催干剂和填充剂,采用常温氧化法制得种新型的改性淀粉纸包装黏合剂。吴津蓉等^[63]研究酸改性小麦淀粉在慕斯中的应用,采用酸改性的小麦淀粉替代明胶作为混合凝固剂制作慕斯蛋糕,并对改性淀粉慕斯蛋糕参数优化,发现慕斯蛋糕的最佳配方 7.5 g 复合凝固剂,180 g 奶油,50 g 砂糖,150 g 草莓,并且进行 5 h 以上的冷藏,制作出的慕斯蛋糕口感最好。顾俊等^[64]用小麦淀粉研制出改性胶黏剂的最佳工艺条件:小麦淀粉 30%、淀粉氧化温度为 50 ℃~55 ℃、糊化和交联温度为 55 ℃~60 ℃、糊化 pH 值为 12~13、交联 pH 值为 10~

11、复合交联剂 4%,交联时间为 60 min,使改性后的小麦淀粉胶黏剂(14.66 MPa)内接强度明显强于脲醛树脂(urea resin,UF)胶黏剂(14.04 MPa)。田莉雯等^[65]以小麦淀粉和玉米淀粉为成膜基质,采用流延法制备可食用膜,结果表明制膜的最佳工艺条件:小麦淀粉与玉米淀粉的质量比 60:40,山梨醇含量 0.6%,柠檬酸含量 2.5%,增强剂含量 1.4%,糊化温度 85 ℃,糊化时间 40 min,制成的淀粉溶液浓度为 60 g/L,再干燥 4 h~6 h,此最优工艺条件下制成的复合膜拉伸强度为 14 MPa~15 MPa,断裂伸长率为 30%~33%。Li 等^[66]研究连续三酶改性小麦淀粉的流变特性和糊化特性,结果表明小麦淀粉经 β -淀粉酶、转移葡萄糖苷酶和普鲁兰酶连续处理后,其链长分布、黏弹性和凝胶强度均有明显改善,其改性淀粉可作为小麦淀粉基食品如软糖、果酱、甜点等的添加剂。

4 结语

小麦淀粉具有独特的理化性质,比如:较低的糊化温度,较好的淀粉糊的黏度和较好的热稳定性等特点,并且小麦淀粉是食品及其它工业的重要原料,随着工业加工的深入研究,小麦淀粉的应用越来越广泛,然而在小麦淀粉的基础研究和应用研究领域还有许多待开发的空間,应该切实采取措施,促进小麦淀粉在食品和工业中的进一步应用,为进一步开发小麦资源提供一定理论指导。

参考文献:

- [1] XIONG F, YU X R, ZHOU L, et al. Effect of nitrogen fertilizer on distribution of starch granules in different regions of wheat endosperm[J]. The Crop Journal, 2014, 2(1): 46-54.
- [2] ZHANG Y F, LOU H Y, GUO D D, et al. Identifying changes in the wheat kernel proteome under heat stress using iTRAQ[J]. The Crop Journal, 2018, 6(6): 600-610.
- [3] 陈佩, 张晓, 赵冰, 等. 湿热处理对糯小麦淀粉理化性质的影响[J]. 华南农业大学学报, 2015, 36(2): 85-89.
CHEN Pei, ZHANG Xiao, ZHAO Bing, et al. Effect of heat-moisture treatment on the physicochemical properties of waxy wheat starch[J]. Journal of South China Agricultural University, 2015, 36(2): 85-89.
- [4] BROUILLET-FOURMANN S, CARROT C, MIGNARD N. Gelatinization and gelation of corn starch followed by dynamic mechanical spectroscopy analysis[J]. Rheologica Acta, 2003, 42(1-2): 110-117.
- [5] FUNAMI T, KATAOKA Y, OMOTO T, et al. Effects of non-ionic polysaccharides on the gelatinization and retrogradation behavior of wheat starch[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(1): 1-13.

- [6] TAKO M, TAMAKI Y, TERUYA T, et al. The principles of starch gelatinization and retrogradation[J]. Food and Nutrition Sciences, 2014, 5(3): 280–291.
- [7] 董凯娜. 小麦品种淀粉特性与面条质量关系的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012.
DONG Kaina. The relationship between starch properties of wheat and noodle quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012.
- [8] 杨月月, 王晓曦, 马森. 小麦淀粉性质及其对面制品影响的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(12): 19–21.
YANG Yueyue, WANG Xiaoxi, MA Sen. Study on properties of wheat starch and effects on flour products[J]. Cereals & Oils, 2018, 31(12): 19–21.
- [9] SU H, TU J J, ZHENG M J, et al. Effects of oligosaccharides on particle structure, pasting and thermal properties of wheat starch granules under different freezing temperatures[J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126209.
- [10] PÉREZ S, BERTOFT E. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review[J]. Starch – Stärke, 2010, 62(8): 389–420.
- [11] TANG H J, MITSUNAGA T, KAWAMURA Y. Molecular arrangement in blocklets and starch granule architecture[J]. Carbohydrate Polymers, 2006, 63(4): 555–560.
- [12] 聂丹. 多种淀粉颗粒的扫描电镜下的形态分析[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(33): 11863–11865.
NIE Dan. Morphology analysis of a variety of starch granules by using scanning electron microscope[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(33): 11863–11865.
- [13] 郑学玲, 张玉玉, 张杰. 青稞淀粉和小麦淀粉的理化性质比较研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(10): 52–56.
ZHENG Xueling, ZHANG Yuyu, ZHANG Jie. Comparison of physicochemical properties of hull-less barley starch and wheat starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(10): 52–56.
- [14] 姚大年, 刘广田. 淀粉理化特性、遗传规律及小麦淀粉与品质的关系[J]. 粮食与饲料工业, 1997(2): 38–40.
YAO Danian, LIU Guangtian. Physicochemical characteristics and genetics laws of starch as well as the relationship of wheat starch to qualities[J]. Cereal & Feed Industry, 1997(2): 38–40.
- [15] 秦中庆, 王美芳, 薛英杰, 等. 小麦淀粉品质的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2001(11): 6–8.
QIN Zhongqing, WANG Meifang, XUE Yingjie, et al. A study on wheat starch quality[J]. Cereal & Feed Industry, 2001(11): 6–8.
- [16] 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.
- [17] 孔露, 孔茂竹, 余佳熹, 等. 糊化处理对藜麦淀粉形态、结构及热特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 56–61, 67.
KONG Lu, KONG Maozhu, YU Jiayi, et al. Effect of gelatinization treatment on morphology, structure and thermal properties of *Chenopodium quinoa* starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(14): 56–61, 67.
- [18] MATVEEV Y I, VAN SOEST J J G, NIEMAN C, et al. The relationship between thermodynamic and structural properties of low and high amylose maize starches[J]. Carbohydrate Polymers, 2001, 44(2): 151–160.
- [19] 甘淑珍, 付一帆, 赵思明. 小麦淀粉糊化的影响因素及黏度稳定性研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(2): 36–39.
GAN Shuzhen, FU Yifan, ZHAO Siming. Forming and viscosity stability of wheat starch paste[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(2): 36–39.
- [20] 张正茂, 王志华, 颜永斌. 不同来源淀粉的糊化特性研究[J]. 食品工业, 2016, 37(6): 141–145.
ZHANG Zhengmao, WANG Zhihua, YAN Yongbin. Pasting properties of starch from different sources[J]. The Food Industry, 2016, 37(6): 141–145.
- [21] 吕元娣, 常雅宁, 戴伟, 等. 青稞淀粉的糊化特性及凝胶性能[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 33–38.
LÜ Yuandi, CHANG Yaning, DAI Wei, et al. Pasting and gel properties of hullless barley starch[J]. Food & Machinery, 2016, 32(3): 33–38.
- [22] 赵凯, 李君, 刘宁, 等. 小麦淀粉老化动力学及玻璃化转变温度[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 100–105.
ZHAO Kai, LI Jun, LIU Ning, et al. Retrogradation kinetics and glass transition temperature of wheat starch[J]. Food Science, 2017, 38(23): 100–105.
- [23] 范逸超, 谢新华, 沈玥, 等. γ -聚谷氨酸对小麦淀粉糊化及流变学特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(5): 33–37.
FAN Yichao, XIE Xinhua, SHEN Yue, et al. Effect of poly- γ -glutamic acid on the pasting and rheological properties of wheat starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(5): 33–37.
- [24] 梁国香, 卜祥辉, 孙庆杰. 小麦纤维对小麦淀粉理化特性的影响[J]. 青岛农业大学学报(自然科学版), 2013, 30(1): 42–45.
LIANG Guoxiang, BU Xianghui, SUN Qingjie. Effects of wheat fiber on physico-chemical properties of wheat starch[J]. Journal of Qingdao Agricultural University (Natural Science), 2013, 30(1): 42–45.
- [25] LIAN X J, ZHAO S Y, LIU Q S, et al. A photographic approach to the possible mechanism of retrogradation of sweet potato starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2011, 48(1): 125–128.
- [26] 郭俊杰, 孙海波, 吴宏, 等. 小麦淀粉回生研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(2): 354–357, 363.
GUO Junjie, SUN Haibo, WU Hong, et al. Research progress in wheat starch retrogradation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(2): 354–357, 363.
- [27] WANG S J, LI C L, COPELAND L, et al. Starch retrogradation: A comprehensive review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2015, 14(5): 568–585.

- [28] 牟汝华. 水分含量和凝胶化终温对淀粉回生的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- MOU Ruhua. The effect of water contents and preheating temperatures on starch retrogradation[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2018.
- [29] KING A, KALETUNÇ G. Retrogradation characteristics of high hydrostatic pressure processed corn and wheat starch[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, 98(1): 83–89.
- [30] 张玉荣, 刘月婷, 张德伟, 等. 小麦中淀粉在不同储藏温湿度下糊化特性的变化[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2014, 35(2): 10–15, 20.
- ZHANG Yurong, LIU Yueting, ZHANG Dewei, et al. Changes on pasting properties of wheat starch under different storage temperature and humidity[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2014, 35(2): 10–15, 20.
- [31] CIEŚLA K, ELIASSON A C. DSC studies of retrogradation and amylose–lipid complex transition taking place in gamma irradiated wheat starch[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions With Materials and Atoms, 2007, 265(1): 399–405.
- [32] 谢新华, 贺平, 宋一诺, 等. 月桂酸对小麦淀粉凝胶回生特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(10): 1350–1354.
- XIE Xinhua, HE Ping, SONG Yinuo, et al. Effect of lauric acid on the retrogradation properties of wheat starch gels[J]. Journal of Triticeae Crops, 2016, 36(10): 1350–1354.
- [33] 邢燕, 熊柳, 孙庆杰. 木糖醇对小麦淀粉和复配粉糊化及回生特性影响[J]. 中国粮油学报, 2013, 28(4): 32–36.
- XING Yan, XIONG Liu, SUN Qingjie. The influence of xylitol on the gelatinization and retrogradation properties of wheat starch and blended flour[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28(4): 32–36.
- [34] 徐进, 徐学明, 金征宇, 等. 极限糊精对小麦淀粉回生的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(11): 1136–1141.
- XU Jin, XU Xueming, JIN Zhengyu, et al. Influence of limit dextrin on wheat starch retrogradation[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2014, 33(11): 1136–1141.
- [35] 王晨, 谢岩黎, 南永远. 阿魏酸对小麦淀粉理化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 12–16, 21.
- WANG Chen, XIE Yanli, NAN Yongyuan. Effect of ferulic acid on physicochemical properties of wheat starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(18): 12–16, 21.
- [36] GUO J J, LIAN X J, KANG H Q, et al. Effects of glutenin in wheat gluten on retrogradation of wheat starch[J]. European Food Research and Technology, 2016, 242(9): 1485–1494.
- [37] TENG L Y, CHIN N L, YUSOF Y A. Rheological and textural studies of fresh and freeze–thawed native sago starch–sugar gels. I. Optimisation using response surface methodology[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(6): 1530–1537.
- [38] 宁吉英, 顾丰颖, 高萍萍, 等. 蜡质玉米淀粉凝胶的冻融稳定性[J]. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1514–1524.
- NING Jiyong, GU Fengying, GAO Pingping, et al. Freeze–thaw stability of waxy corn starch gels[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(8): 1514–1524.
- [39] 贾春利, 黄卫宁, 邹奇波, 等. 热稳定冰结构蛋白对小麦淀粉凝胶冻融稳定性的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(7): 83–87.
- JIA Chunli, HUANG Weining, ZOU Qibo, et al. Influence of thermal stable ice–structuring proteins extracted from oat flour and Chinese privet leaves on freeze–thaw stability of wheat starch gels[J]. Food Science, 2012, 33(7): 83–87.
- [40] 张华, 袁博, 赵琼, 等. 小麦淀粉凝胶冻融稳定性研究[J]. 食品工业, 2015, 36(3): 35–37.
- ZHANG Hua, YUAN Bo, ZHAO Qiong, et al. Study on freeze–thaw stability of wheat starch gel[J]. The Food Industry, 2015, 36(3): 35–37.
- [41] 谢新华, 范逸超, 徐超, 等. γ -聚谷氨酸对小麦淀粉凝胶冻融稳定性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 97–101.
- XIE Xinhua, FAN Yichao, XU Chao, et al. Effects of γ -polyglutamic acid on freeze–thaw stability of wheat starch gel[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(14): 97–101.
- [42] 代蕾, 姬娜, 熊柳, 等. 魔芋胶对小麦淀粉理化性质影响研究[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(7): 32–34.
- DAI Lei, JI Na, XIONG Liu, et al. Study on effect of konjac gum on physicochemical properties of wheat starch[J]. Cereals & Oils, 2013, 26(7): 32–34.
- [43] 谢新华, 朱鸿帅, 宋一诺, 等. 单甘酯对小麦淀粉凝胶冻融稳定性的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(7): 55–59.
- XIE Xinhua, ZHU Hongshuai, SONG Yinuo, et al. Effect of monostearin on freeze–thaw stability of wheat starch gels[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(7): 55–59.
- [44] 戚明明, 郭鹏, 汪陈洁, 等. 挤压对淀粉微观结构和理化性质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(5): 305–310.
- QI Mingming, GUO Peng, WANG Chenjie, et al. Research progress of the effects of extrusion on microstructure and physicochemical properties of starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(5): 305–310.
- [45] 刘强, 王艳红, 陈玉放, 等. 高温下淀粉的凝胶化作用[J]. 广州化学, 2002, 27(2): 31–34.
- LIU Qiang, WANG Yanhong, CHEN Yufang, et al. Gelatinization behavior during the high temperature process of starch[J]. Guangzhou Chemistry, 2002, 27(2): 31–34.
- [46] 赵敏. 淀粉类凝胶食品制备及特性研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2014.
- ZHAO Min. Study on the preparation and characteristics of starch gel foods[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2014.
- [47] 吴桂玲, 李文浩, 郭洪梅, 等. 脱脂脱蛋白处理对小麦 A、B 淀粉理化性质的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(10): 227–233.
- WU Guiling, LI Wenhao, GUO Hongmei, et al. Effects of defatting coupled with deproteinization on the physicochemical properties of A- and B-type wheat starch[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(10): 227–233.

- [48] SUN Q, WU M, BU X, et al. Effect of the amount and particle size of wheat fiber on the physicochemical properties and gel morphology of starches[J]. PLoS One, 2015, 10(6): e0128665.
- [49] ZHANG Z W, LI E P, FAN X Y, et al. The effects of the chain-length distributions of starch molecules on rheological and thermal properties of wheat flour paste[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 101: 105563.
- [50] 任顺成, 孙晓莎. 芦丁和槲皮素对小麦淀粉理化特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 25-30.
REN Shuncheng, SUN Xiaosha. Effects of rutin and quercetin on the physicochemical properties of wheat starch[J]. Food Science, 2018, 39(2): 25-30.
- [51] 宋一诺, 谢新华, 艾志录, 等. 月桂酸对不同直链淀粉含量小麦淀粉黏滞性和质构特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(9): 52-56, 63.
SONG Yinuo, XIE Xinhua, AI Zhilu, et al. Effect of lauric acid on the viscosity and textural properties of wheat starch with varying amylose content[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2016, 31(9): 52-56, 63.
- [52] 王诗雁, 韩忠, 刘忠义, 等. 电场处理对大米淀粉理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(3): 31-37.
WANG Shiyang, HAN Zhong, LIU Zhongyi, et al. Effects of pulsed electric field treatment on the physico-chemical properties of rice starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(3): 31-37.
- [53] 刘瑞, 冯佰利, 晁桂梅, 等. 苦荞淀粉颗粒及淀粉糊性质研究[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(12): 31-36.
LIU Rui, FENG Baili, CHAO Guimei, et al. The properties of Tartary buckwheat starch granules and starch paste[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(12): 31-36.
- [54] 高金梅, 黄倩, 郭洪梅, 等. 冻融循环处理对玉米淀粉凝胶结构及颗粒理化特性的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(2): 181-189.
GAO Jinmei, HUANG Qian, GUO Hongmei, et al. Effect of freeze-thawing cycles on the physicochemical properties of corn starch gels and granules[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(2): 181-189.
- [55] 侯蕾, 韩小贤, 郑学玲, 等. 不同种类淀粉理化性质的比较[J]. 粮食加工, 2015, 40(2): 32-37.
HOU Lei, HAN Xiaoxian, ZHENG Xueling, et al. Comparison of physicochemical properties of different types of starch[J]. Grain Processing, 2015, 40(2): 32-37.
- [56] 张慧娟, 王静, 刘英丽, 等. 碱法提取青稞淀粉的理化性质研究[J]. 中国食品学报, 2016, 16(3): 75-80.
ZHANG Huijuan, WANG Jing, LIU Yingli, et al. Studies on physicochemical properties of hull-less barley starch obtained by the alkali extraction method[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(3): 75-80.
- [57] APRIANITA A, VASILJEVIC T, BANNIKOVA A, et al. Physicochemical properties of flours and starches derived from traditional Indonesian tubers and roots[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(12): 3669-3679.
- [58] 郑学玲, 张玉玉, 张杰. 青稞淀粉理化特性的研究[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(4): 30-36.
ZHENG Xueling, ZHANG Yuyu, ZHANG Jie. Study on physicochemical properties of hull-less barley starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(4): 30-36.
- [59] ŠUBARIĆ D, AČKAR Đ, BABIĆ J, et al. Modification of wheat starch with succinic acid/acetic anhydride and azelaic acid/acetic anhydride mixtures I. Thermophysical and pasting properties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 51(10): 2616-2623.
- [60] 李素云, 李星科, 张华, 等. 不同冻藏方式对小麦淀粉功能性质的影响[J]. 现代食品, 2017(22): 67-72.
LI Suyun, LI Xingke, ZHANG Hua, et al. Effect on wheat starch functional properties by different frozen storage[J]. Modern Food, 2017(22): 67-72.
- [61] 王首旗, 张吉亮, 吴国旗. 小麦淀粉改性及用于表面施胶的研究[J]. 中华纸业, 2013, 34(4): 14-16.
WANG Shouqi, ZHANG Jiliang, WU Guoqi. Experiment on wheat starch modification and its application as paper surface sizing agent[J]. China Pulp & Paper Industry, 2013, 34(4): 14-16.
- [62] 杨金田, 彭德婷, 董鸣月. 一种新型改性淀粉纸包装粘合剂的研制[J]. 湖州师范学院学报, 2013, 35(6): 35-38.
YANG Jintian, PENG Deting, DONG Mingyue. The preparation of an environmental protection type of modified starch paper packing adhesive[J]. Journal of Huzhou Teachers College, 2013, 35(6): 35-38.
- [63] 吴津蓉, 车玉红, 杨海燕. 酸改性小麦淀粉在慕斯中的应用研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(13): 23-26.
WU Jinrong, CHE Yuhong, YANG Haiyan. Application of acid modified starch in the mousse[J]. Food Research and Development, 2015, 36(13): 23-26.
- [64] 顾俊, 高桂枝, 丁雨果, 等. 板材生产用小麦淀粉改性环保胶粘剂的研制[J]. 中国胶粘剂, 2017, 26(1): 21-24.
GU Jun, GAO Guizhi, DING Yuguo, et al. Development on wheat starch modified adhesive with environmental protection for producing wood-plank[J]. China Adhesives, 2017, 26(1): 21-24.
- [65] 田莉雯, 陈复生, 宋小勇, 等. 玉米淀粉与小麦淀粉复合可食用膜工艺研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(20): 290-294.
TIAN Liwen, CHEN Fusheng, SONG Xiaoyong, et al. Study on preparation technology of composite edible film of corn starch and wheat starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(20): 290-294.
- [66] LI H, LI J H, GUO L. Rheological and pasting characteristics of wheat starch modified with sequential triple enzymes[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 230: 115667.

加工编辑:冯娜

收稿日期:2020-07-30