

不同粒度小麦粉淀粉的理化特性分析

林江涛*, 孙灵灵, 岳清华

(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450000)

摘要: 以小麦粉在不同粒度下的淀粉为研究对象, 通过分析小麦粉在不同粒度下其破损淀粉含量、糊化特性、颗粒形态、晶体结构、消化特性、冻融稳定性以及热特性, 从而探究小麦粉在不同粒度下其淀粉特性变化。研究表明: 随着粒度的减小, 其破损淀粉含量增加了 78.11%、冻融稳定性从 33.35% 增加到 49.19%; 糊化特性中其黏度、衰减值整体呈先下降后升高趋势, 糊化温度无显著性变化; 淀粉颗粒由聚集到分散且表面更加粗糙; 其淀粉的相对结晶度呈先升高后降低趋势, 在粒度 12XX/-- 时达到最大值为 21.78%, 且在中等粒度时淀粉衍射峰强度较高。快消化淀粉含量先升高后降低, 慢消化淀粉降低了 22.01%, 抗性淀粉含量在中等粒度时较低为 59.88%。淀粉的热特性中峰值温度随着粒度的减小呈升高趋势, 且小麦粉粒度为 13XX/-- 时, 其起始温度较高为 58.55 °C, 而终止温度较低为 69.72 °C。综上所述, 小麦粉在中等粒度时其淀粉特性整体表现较好。该研究可为小麦粉在不同粒度下其淀粉的生产需求提供一定的理论依据。

关键词: 粒度; 糊化特性; 晶体结构; 消化特性; 热特性

文章编号: 1673-9078(2022)08-193-198

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.8.1163

Analysis of Physicochemical Properties of Wheat Flour Starch with Different Particle Sizes

LIN Jiangtao*, SUN Lingling, YUE Qinghua

(College of Food Science and Technology, Henan University of Technology, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The damaged starch content, gelatinization characteristics, particle morphology, crystal structure, digestion characteristics, freeze-thaw stability, and thermal characteristics of starch from wheat flour at different particle sizes was analyzed to explore the changes in the characteristics of starch. The results showed that as particle size decreased, damaged starch content increased by 78.11% and freeze-thaw stability increased from 33.35% to 49.19%. Regarding gelatinization characteristics, the viscosity and attenuation values showed a trend of initial decrease followed by increase, whereas the gelatinization temperature showed no significant change. The starch granules became increasingly dispersed from an agglomerated state, and surface was roughness increased. The relative crystallinity of starch first increased and then decreased, reaching a peak value of 21.78% when the grain size was 12XX--, and exhibited a high diffraction peak intensity at medium particle size. The rapidly digestible starch content first increased and then decreased, slowly digestible starch content decreased by 22.01%, and resistant starch content was 59.88% at medium particle size. Considering starch thermal characteristics, the peak temperature increased with decreasing particle size; when the particlesize of wheat flour was 13XX--, the initial temperature was 58.55 °C and the final temperature was 69.72 °C. In conclusion, the starch characteristics of wheat flour were generally superior at medium particle size. Our findings can provide a theoretical basis for the starch production requirements of wheat flour at different particle sizes.

Key words: particle size; gelatinization characteristics; crystal structure; digestion characteristics; thermal characteristics

引文格式:

林江涛,孙灵灵,岳清华.不同粒度小麦粉淀粉的理化特性分析[J].现代食品科技,2022,38(8):193-198,+192

LIN Jiangtao, SUN Lingling, YUE Qinghua. Analysis of physicochemical properties of wheat flour starch with different particle sizes [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(8): 193-198, +192

收稿日期: 2021-10-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0401001); 河南省科技厅重大专项(141100110900)

作者简介: 林江涛(1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 谷物加工技术与品质, E-mail: hautlin@126.com

小麦是世界上种植范围最广的农作物, 研磨成粉后常用来制作馒头、面条、包子等面制品, 在全球饮食结构中具有重要的地位。小麦籽粒中富含蛋白质、淀粉、脂肪、维生素等人体所需的营养物质, 其中淀粉占小麦籽粒的 75% 左右, 为人体提供营养与能

量,是影响小麦粉品质的重要因素^[1]。在面粉制品的加工中,小麦粉中的蛋白、淀粉和水等物质的相互作用,对其加工品质有着显著性影响^[2]。在小麦胚乳中,淀粉主要以A和B淀粉两种形式存在^[3]。研究表明随着小麦粉粒度的减小,小麦粉其淀粉颗粒中A淀粉含量、破损淀粉含量显著性增大,而B淀粉含量逐渐减少^[4];朱帆等^[5]研究表明B型淀粉容易发生团聚现象,且颗粒大的B型淀粉易与小颗粒淀粉聚集。各粒度区间内淀粉中的直链淀粉和支链淀粉含量无显著性变化^[6]。小麦粉淀粉其凝胶特性中硬度、黏性、咀嚼性和回复性随着小麦粉粒度的减小而增加^[6]。随着粒度的减小,淀粉的热焓值、糊化温度呈降低趋势^[7,8]。研磨强度高时淀粉糊化特性中的衰减值较低^[9]。淀粉的相对结晶度随着破损淀粉含量的增加逐渐降低^[8]。

小麦籽粒通过不同的研磨方式被研磨成颗粒较小的小麦粉,在研磨过程中淀粉的颗粒结构遭到破坏^[10]。研究发现淀粉的特性及组成对馒头、面条等面粉制品有着极为重要的影响。前人对于淀粉的研究较多,关于小麦粉在不同粒度下其淀粉特性的研究较少。本文通过控制不同的研磨条件得到不同粒度下的小麦粉,从而探究小麦粉在不同粒度下其淀粉特性变化,为淀粉的实际应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1M(心磨)磨上物,河南天香面业公司生产。

1.2 仪器与设备

Quanta250FEG扫描电子显微镜,美国FEI仪器公司;SDmatic破损淀粉测定仪,法国CHOPIN;RVA-TM型快速黏度分析仪,瑞典PERTEN公司;D8-Advance型X-射线衍射仪,德国Bruker AXS仪器公司;UV-1100B可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司;差示扫描量热仪,美国Perkin Elmer有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

(1)小麦粉的制备:以取自面粉厂1M(心磨)磨上物为颗粒粉,采用布勒实验磨对颗粒粉进行细化得到六种不同粒度下的小麦粉。即使用实验磨将颗粒粉在低研磨强度下轻轻地研磨再进行筛分,把细颗粒筛分出来,将粗颗粒再次使用实验磨在低研磨强度下轻轻地研磨成细颗粒粉,直至不同筛上物含量小于2%,

剩余的使用钵钵手工进行研磨,直至分别穿过9XX、10XX、11XX、12XX、13XX、15XX筛网,依次得到不同粒度小麦粉9XX/--、10XX/--、11XX/--、12XX/--、13XX/--、15XX/--。

(2)淀粉的提取:参照张玉荣等^[11]的方法制备小麦淀粉。

1.3.2 测定方法

(1)破损淀粉含量:采用Sdmatic破损淀粉仪。

(2)糊化特性:采用GB/T 24853-2010快速黏度法。称取3.0g小麦粉于专用铝盒中,随后加入25mL蒸馏水混合均匀,置于RVA仪中测定糊化特性。样品在50℃保温1min,以12℃/min速度升至95℃,保持2min,以相同速度降至50℃,保持2min。测得小麦粉在不同粒度下的糊化特性。

(3)淀粉颗粒形态:采用扫描电子显微镜对不同粒度小麦粉淀粉进行颗粒形态分析。取少量样品,将其涂在贴有导电双面胶的金属盘上,用离子溅射仪喷金后放置在扫描电镜下,在3000倍下观察样品的颗粒形态。

(4)淀粉颗粒晶体结构:采用X-射线衍射法对小麦淀粉的晶体结构进行测定。测定参数为铜靶CuK α ,电压40kV,电流35mA,功率1400W,扫描范围4~40°,扫描速度4°/min,步长为0.02°。

(5)淀粉的体外消化特性:参照Englyst等^[12]的方法测定淀粉消化特性,并稍加修改。称200mg样品于100mL离心管中,加入15mL醋酸-醋酸钠缓冲液(pH 5.2、0.1mol/L)中,于37℃水浴中预热10min。加入5mL混合酶液(290U/mL猪胰 α -淀粉酶和15U/mL淀粉葡萄糖苷酶),在37℃的恒温振荡器中振荡2h,在20min和120min时各取0.5mL酶解液与4.5mL无水乙醇混合均匀后在5000r/min条件下离心30min。用3,5-二硝基水杨酸(DNS)法测定葡萄糖含量。

快消化性淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)、抗性淀粉(RS)含量计算公式如下:

$$RDS(\%) = \left[\frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{TS} \right] \times 100\%$$

$$SDS(\%) = \left[\frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{TS} \right] \times 100\%$$

$$RS(\%) = (1 - RDS - SDS) \times 100\%$$

式中:

G₀——酶解前的葡萄糖质量,mg;

G₂₀——酶解20min时的葡萄糖质量,mg;

G₁₂₀——酶解120min时的葡萄糖质量,mg;

TS为样品中总淀粉质量,mg。

(6) 淀粉的冻融稳定性: 将样品制成 6% 的淀粉乳, 沸水浴中加热 30 min, 冷却至室温, 于 -20~-15 °C 冷冻 24 h 后取出, 自然解冻, 在 5000 r/min 条件下离心 30 min, 弃去上清液, 称沉淀重, 计算析水率。

$$\text{析水率}/\% = \frac{\text{淀粉糊质量} - \text{沉淀物质量}}{\text{淀粉糊质量}} \times 100\%$$

(7) 淀粉颗粒的热特性: 采用差示扫描量热仪对淀粉颗粒的热特性进行测定。称取 2.5 mg 小麦淀粉, 加 7.5 μL 蒸馏水, 以粉:水=1:3 制样, 室温下平衡 24 h。以空铝盘作对照, 扫描过程以 10 °C/min 的速度从 20 °C 升至 120 °C。

1.4 数据处理

采用 Origin 2018 进行图表绘制, 采用 SPSS 软件对数据进行分析。每次实验重复 3 次, 采用平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 破损淀粉含量

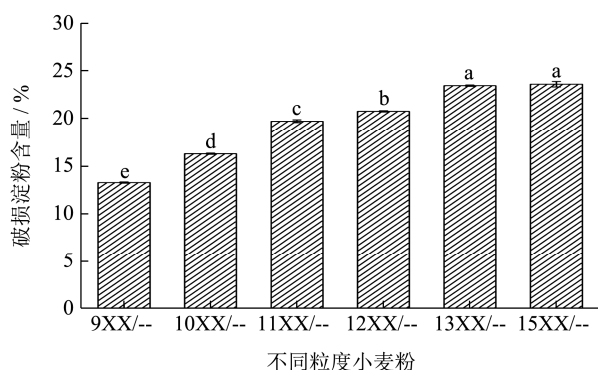


图1 不同粒度小麦粉破损淀粉含量

Fig.1 Damaged starch content of wheat flour with different particle sizes

注: 不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

表1 不同粒度小麦粉糊化特性

Table 1 Gelatinization characteristics of wheat flour with different particle size

样品	峰值黏度/(CP)	最低黏度/(CP)	衰减值/(CP)	最终黏度/(CP)	回生值/(CP)	糊化温度/°C
9XX/--	2945.5±33.23 ^a	2262.0±35.36 ^{ab}	683.5±2.12 ^a	3442.5±27.58 ^b	1180.5±7.78 ^b	68.2±0.00 ^{abc}
10XX/--	2887.0±5.66 ^{ab}	2291.0±1.41 ^a	596.0±7.07 ^b	3399.5±13.44 ^{bc}	1108.5±12.02 ^c	67.9±0.57 ^{bc}
11XX/--	2833.5±21.92 ^{bc}	2291.0±4.24 ^a	542.5±26.16 ^{cd}	3363.0±15.56 ^{cd}	1072.0±19.80 ^d	69.0±0.00 ^a
12XX/--	2806.5±9.19 ^c	2242.5±10.61 ^{ab}	564.0±1.41 ^{bc}	3510.5±17.68 ^a	1268.0±7.07 ^a	67.7±0.14 ^c
13XX/--	2702.5±14.85 ^d	2186.5±16.26 ^c	516.0±1.41 ^d	3216.0±31.11 ^e	1029.5±14.85 ^e	69.0±0.04 ^a
15XX/--	2778.0±48.08 ^c	2218.5±26.16 ^{bc}	559.5±21.92 ^c	3310.5±31.82 ^d	1092.0±5.66 ^{cd}	68.7±0.57 ^{ab}

淀粉的颗粒形态能够较为直观的反映粒度对淀粉颗粒表面结构的影响。完整淀粉颗粒的形状通常为椭圆形或圆形, 颗粒表面较光滑, 且分散性好。由图 2

破损淀粉是小麦胚乳在研磨过程中因受到热损失或机械力的碾压, 完整淀粉颗粒的外层细胞膜被损伤而形成的。随着小麦粉粒度的减小, 破损淀粉含量显著性增加, 这与赵学敬^[4]的研究结果一致。这可能是由于小麦粉粒度越小, 粉碎的越彻底, 淀粉颗粒被破坏的程度越高, 从而导致破损淀粉含量升高^[13]。破损淀粉的吸水率是正常淀粉的 5 倍, 随着破损含量的增多, 导致面团吸水率增加。部分淀粉被酸、酶等分解成糊精、葡萄糖、麦芽糖等物质, 影响小麦粉在不同粒度下面团的发酵特性及烘焙时的吸水量, 从而对面制品品质产生一定的影响。

2.2 糊化特性

糊化特性常用于评估小麦和小麦粉品质。糊化的本质是水分进入结晶区域, 造成淀粉颗粒内部有序结构的破坏。表 1 为不同粒度小麦粉糊化特性, 可以看出当小麦粉粒度减小时, 小麦粉黏度、衰减值、回生值整体上呈先降低后升高趋势, 而糊化温度无显著性变化。峰值黏度反映淀粉糊在糊化升温过程中淀粉颗粒的膨胀程度, 峰值黏度随着粒度的减小而降低可能与淀粉中支、直链淀粉含量、破损淀粉含量、淀粉的膨胀程度有关, 这与王崇崇^[7]和 Blanchard 等^[14]研究的小麦粉随着粒度减小其峰值黏度的变化结果一致。衰减值反映在加热过程中淀粉颗粒结构的稳定性, 当衰减值越大时淀粉结构越不稳定^[15]。由表 1 数据知, 随着粒度减小, 其衰减值逐渐下降, 说明淀粉结构越稳定。衰减值大表明其糊化时淀粉热稳定性差, 这可能是由于淀粉颗粒结构松散、强度较低导致的^[16]。回生值是指最终黏度与最低黏度的差值, 研究结果发现随着小麦粉粒度减小, 其回生值整体呈减小趋势, 这与 Kim 等^[17]研究结果一致。

2.3 淀粉的颗粒形态

可以看出, 随着小麦粉粒度的减小, 其淀粉颗粒由聚集逐渐分散, 且不规则的淀粉颗粒增多, 部分颗粒破裂, 破损淀粉含量增加, 且淀粉颗粒表面变得较为粗

糙。这与 Barak 等^[18]研究结果较一致,说明研磨力度对淀粉颗粒的破损程度影响较大,随着小麦粉粒度的减小,其淀粉颗粒的破损程度就越大。

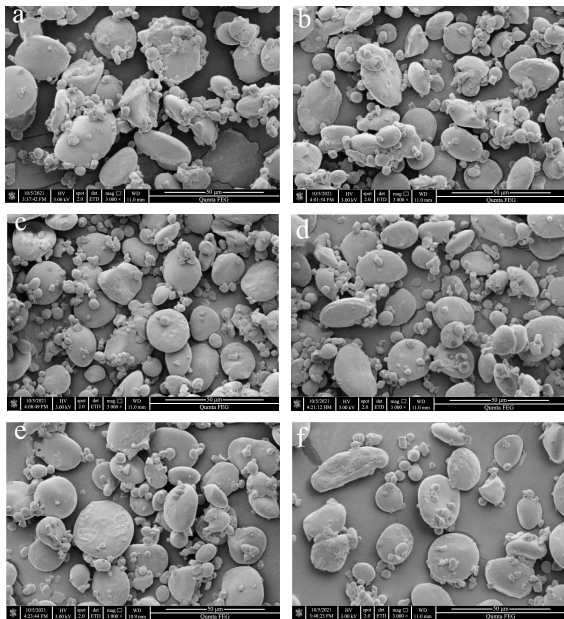


图2 小麦粉在不同粒度下其淀粉的颗粒形态

Fig.2 Starch particle morphology of wheat flour at different particle sizes

注: a、b、c、d、e、f 分别为样品 9XX/--、10XX/--、11XX/--、12XX/--、13XX/--、15XX/--。

2.4 淀粉颗粒晶体结构

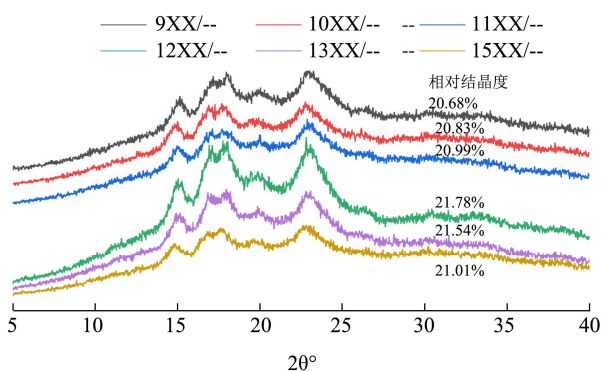


图3 小麦粉在不同粒度下其淀粉的X-衍射图谱

Fig.3 X-ray diffraction patterns of starch of wheat flour at different particle sizes

淀粉颗粒的分子结构是半晶层和无定形层组成^[19],含有10个以上葡萄糖单位的支链淀粉的外链以双螺旋形式存在结晶区,结晶为A或B晶型,或者二者的混合物^[20]。不同粒度小麦粉淀粉的X射线衍射图谱及相对结晶度如图3所示。不同粒度小麦粉淀粉其衍射角未发生变化,在15°、17°、18°和23°处均出现特征衍射峰,均属于A型晶体结构^[21],说明小麦粉粒度大小不会改变淀粉颗粒的晶体结构。A型晶体结

构较紧密,在食品加工中水分子不易进入结晶区,稳定性较好。同时,在20°处出现一个较小的衍射峰,这可能是支链淀粉脂质复合物的特征。小麦粉粒度过大或过小时淀粉其衍射峰的强度较弱,导致这种现象的原因可能是在制粉过程中淀粉颗粒内部结构被破坏,在空间结构上直、支链淀粉产生无需重组,从而使其内部结构从结晶区转为无定形区^[22,23]。小麦粉在不同粒度下淀粉的相对结晶度随着小麦粉粒度的减小整体呈先升高后降低趋势,说明中等粒度小麦粉的相对结晶度较高。原因是随着小麦粉粒度的减小,小麦粉中A淀粉含量越高,而A淀粉中的相对结晶度比B淀粉中高,随着小麦粉粒度的减小其淀粉的相对结晶度升高。但当小麦粉粒度过小时,淀粉破裂程度增加,晶体结构遭到破坏,其相对结晶度降低^[24]。

2.5 淀粉的体外消化特性

淀粉颗粒的体外消化特性主要涉及到酶对底物的可及性和水解活性,而水解活性一般取决于淀粉在颗粒中的超分子排列以及其分子的分支密度^[25]。根据淀粉在小肠中的消化时间,淀粉通常被分为快消化淀粉(RDS)、慢消化淀粉(SDS)和抗性淀粉(RS)^[11]。支链淀粉和直链淀粉含量变化会影响小麦淀粉的消化特性,支链淀粉的老化会影响SDS含量,而直链淀粉老化也会对RS含量产生一定影响^[26]。由表2可知,随着小麦粉粒度的减小,其淀粉的消化特性中RDS含量整体呈先升高后降低趋势,SDS含量范围为16.02%~20.54%。当小麦粉的粒度较大时,直链淀粉与脂质形成的结晶结构较稳定,淀粉颗粒表面形成屏障层,从而影响酶与淀粉分子接触,导致RDS含量降低,SDS含量增加。在小麦粉粒度11XX/--时RS含量为59.88%较低,其原因可能是此时的淀粉中直链淀粉含量较低导致的。相比于淀粉中的支链淀粉,直链淀粉易与油脂等形成复合物,从而导致RS更难被消化。

表2 小麦粉在不同粒度下其淀粉的消化特性

Table 2 Digestibility of starch of wheat flour at different particle sizes

样品	RDS/%	SDS/%	RS/%
9XX/--	18.73±1.01 ^d	20.54±0.20 ^a	60.73±1.21 ^b
10XX/--	20.62±0.52 ^{bc}	16.02±0.49 ^e	63.36±0.03 ^a
11XX/--	23.36±0.75 ^a	17.72±1.26 ^{de}	59.88±0.27 ^b
12XX/--	20.68±0.94 ^{bc}	18.56±0.76 ^{bc}	60.67±0.04 ^b
13XX/--	19.68±0.24 ^{cd}	19.29±0.25 ^{ab}	61.03±0.01 ^b
15XX/--	21.72±0.39 ^b	17.72±0.51 ^{cd}	60.56±0.90 ^b

注: 同列不同字母表示差异显著 ($p < 0.05$)。

2.6 淀粉的冻融稳定性

淀粉的冻融稳定性是评价淀粉类冷冻食品品质的关键指标^[27]。淀粉的冻融稳定性反映淀粉的老化程度,常用来评价凝胶体系的稳定性。析水率与淀粉的冻融稳定性呈负相关,析水率越高表明淀粉的冻融稳定性越差,其老化程度越高^[28]。小麦粉在不同粒度下其淀粉的冻融稳定性结果如图4所示,随着小麦粉粒度的减小,其析水率整体呈升高趋势,说明淀粉的冻融稳定性随着粒度的减小而逐渐降低。导致这种现象的原因可能为随着小麦粉粒度的减小,淀粉颗粒破坏程度增加,其破损淀粉含量增加,冷却时,淀粉颗粒与水分子的结合能力降低,导致淀粉糊的析水率增加,其冻融稳定性降低^[7]。淀粉分子之间是通过氢键连接的,随着冷冻时间的增加,淀粉分子间的作用力增强,形成的凝胶束迫使淀粉凝胶中的水分析出,并伴随着淀粉颗粒糊化成海绵状,原有的胶体结构被破坏^[29]。

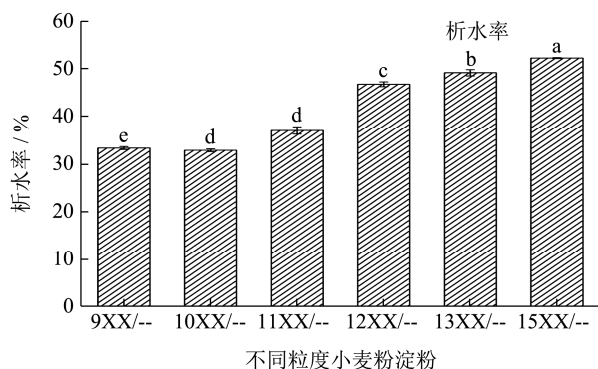


图4 小麦粉在不同粒度下其淀粉的冻融稳定性

Fig.4 Freeze-thaw stability of starch of wheat flour at different particle sizes

2.7 淀粉颗粒的热特性

淀粉的热力学特性表示淀粉糊化过程中的热力学变化。由于淀粉的颗粒结构是半结晶的,故在加热过程中淀粉在水中发生糊化,淀粉的晶体结构逐步转化为无定形态,分子结构开始瓦解,同时还伴随着能量的相互转化。小麦粉粒度为13XX/--时,起始温度(T_0)达到最大,说明此时所需的初始糊化温度最高,这与糊化特性中小麦粉的糊化温度研究结果相一致。Ji^[30]的研究发现, T_0 常用来测定淀粉的微晶完整度,当微晶越坚固时,所需的初始糊化温度就越高。导致这种现象的原因可能是蛋白堵住淀粉表面的通道,水分子渗入淀粉晶体内部速度受阻从而影响淀粉的溶胀,导致其糊化温度升高。随着小麦粉粒度的减小,其淀粉的峰值温度(T_p)整体呈上升趋势,这与王崇崇^[7]的研究结果相一致。其原因为淀粉在糊化过程中其晶体

结构从无定形区转变成结晶区,同时内部释放短链晶体含量增加,且双螺旋结构之间形成的结晶簇更加紧密导致的^[31]。随着小麦粉粒度的减小,其终止温度(T_c)范围为69.72℃~72.08℃,整体呈先升高后降低趋势,且在13XX/--时最低。

表3 小麦粉在不同粒度下其淀粉的热特性

Table 3 Thermal properties of starch of wheat flour at different particle sizes

样品	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$
9XX/--	58.03±0.04 ^b	62.18±0.05 ^b	70.23±0.06 ^d
10XX/--	57.72±0.12 ^c	62.09±0.10 ^b	71.15±0.06 ^b
11XX/--	58.11±0.09 ^b	62.17±0.08 ^b	71.24±0.08 ^b
12XX/--	58.36±0.06 ^a	62.42±0.09 ^a	70.53±0.06 ^c
13XX/--	58.55±0.06 ^a	62.56±0.08 ^a	69.72±0.08 ^c
15XX/--	58.42±0.07 ^a	62.44±0.05 ^a	72.08±0.09 ^a

注: 同列不同字母表示差异显著 ($p<0.05$)。

3 结论

本文通过主动控制研磨条件和最终粒度结果,得到不同粒度的小麦粉,从而研究小麦粉在不同粒度下其淀粉的特性。研究表明:随着粒度的减小,其破损淀粉含量从13.25%增加到23.60%;峰值黏度、最低黏度、最终黏度、衰减值、回生值整体呈先降低后升高趋势,且在粒度为13XX/--时达到最低值,而糊化温度无明显变化;淀粉颗粒由聚集逐渐分散且表面更加粗糙;小麦粉在不同粒度下淀粉其晶型都属于A晶型,且中等粒度小麦粉淀粉其衍射峰的强度较强,其淀粉的相对结晶度从20.68%增加到21.78%。快消化淀粉含量呈先升高后降低趋势,慢消化淀粉降低22.01%,抗性淀粉含量在中等粒度时较低为59.88%。小麦粉在不同粒度下其淀粉的冻融稳定性随着粒度的减小显著性增加了47.50%。淀粉的热特性中随着粒度的减小峰值温度整体呈升高趋势,且小麦粉粒度为13XX/--时,其淀粉的起始温度较高为58.55℃而终止温度此时较低为69.72℃。小麦粉在中等粒度下其淀粉特性较好,实际应用时应根据具体需求选择合适的小麦粉粒度的淀粉。

参考文献

- [1] 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. Physiochemical characteristics and genetics laws of starch as well as the relationship of wheat starch qualities [J]. Cereal & Feed Industry, 1997, 2:38-40

- [2] Blanchard C, Labouré H, Verel A, et al. Study of the impact of wheat flour type, flour particle size and protein content in a cake-like dough: Proton mobility and rheological properties assessment [J]. *Journal of Cereal Science*, 2012, 56(3): 35-40
- [3] Hung P V, Morita N. Physicochemical properties of hydroxypropylated and cross-linked starches from A-type and B-type wheat starch granules [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 59(2): 239-246
- [4] 赵学敬. 小麦粉粒度变化与淀粉损伤程度[J]. *粮食加工*, 2010, 35(1): 26-30
ZHAO Xuejing. Wheat flour particle size changes and the degree of starch damage [J]. *Grain Processing*, 2010, 35(1): 26-30
- [5] 朱帆, 徐广文, 姚历, 等. 小麦淀粉颗粒的微观结构研究[J]. *食品科学*, 2008, 5: 93-96
ZHU Fan, XU Guangwen, YAO Li. Study on micro-structure properties of wheat starch granule [J]. *Food Science*, 2008, 5: 93-96
- [6] 齐婧, 吕莹果, 王远辉. 不同粒度区间小麦粉的淀粉特征[J]. *食品科技*, 2017, 42(7): 164-170
QI Jing, LYU Yingguo, WANG Yuanhui. Starch characteristics of different grain size of wheat flour [J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(7): 164-170
- [7] 王崇崇. 粒度对小麦粉及面条品质特性的影响机理研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018
WANG Chongchong. The effect of particle size on the quality characteristics of wheat flour and noodles [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2018
- [8] 李静. 不同损伤程度小麦淀粉糊化性质差异机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016
LI Jing. Mechanism study of different pasting properties on wheat starch with different damage levels [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016
- [9] 何兆位, 刘雄, 赵天天, 等. 紫薯粉对面包粉流变学及糊化特性的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(8): 6-9, 30
HE Zhaowei, LIU Xiong, ZHAO Tiantian. The influence of purple potato starch on bread flour rheology properties and gelatinization characteristics [J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(8): 6-9, 30
- [10] De L H E, Gomez M, Rosell C M. Particle size distribution of rice flour affecting the starch enzymatic hydrolysis and hydration properties [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 98(1): 421-427
- [11] 张玉荣, 魏秋瑞, 夏欣雨. 不同虫态蛀蚀性害虫侵害对小麦淀粉颗粒特性的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(5): 83-88
ZHANG Yurong, WEI Qiurui, XIA Xinyu. Effect of different stages of boring insect pests infestation on granule properties of wheat starch [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 40(5): 83-88
- [12] Englyst H N, Kingman S M, Cummings J H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 1992, 46(2): 33-50
- [13] 杨艳虹, 王秀忠, 檀革宝, 等. 不同粒度小麦粉的理化特性研究[J]. *粮食加工*, 2009, 34(2): 19-22
YANG Yanhong, WANG Xiuzhong, TAN Gebao, et al. Study on physicochemical properties of wheat flour with different particle size [J]. *Grain Processing*, 2009, 34(2): 19-22
- [14] Blanchard C, Laboure H, Verel A, et al. Study of the impact of wheat flour type, flour particle size and protein content in a cake-like dough: Proton mobility and rheological properties assessment [J]. *Journal of Cereal Science*, 2012, 56(3): 691-698
- [15] 吴青兰. 脱皮率对小麦粉、面团及馒头品质的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019
WU Qinglan. Effect of peeling rate on quality of wheat flour, dough and steamed bread [D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2019
- [16] 刘强, 田建珍, 李佳佳. 小麦粉粒度对其糊化特性影响的研究[J]. *现代面粉工业*, 2012, 26(6): 16-20
LIU Qiang, TIAN Jianzhen, LI Jiajia. Study on the effect of grain size of wheat flour on its gelatinization properties [J]. *Modern Flour Milling Industry*, 2012, 26(6): 16-20
- [17] Kim J M, Shin M. Effects of particle size distributions of rice flour on the quality of gluten-free rice cupcakes [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2014, 59(1): 526-532
- [18] Barak S, Mudgil D, Khatkar B S. Effect of flour particle size and damaged starch on the quality of cookies [J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2014, 51(7): 1342-1348
- [19] Waterschoot J, Gomand S V, Fierens E, et al. Production, structure, physicochemical and functional properties of maize, cassava, wheat, potato and rice starches [J]. *Starch-Starke*, 2015, 67(1-2): 14-29
- [20] Salman H, Blazek J, Lopez-rubio A, et al. Structure-function relationships in A and B granules from wheat starches of similar amylose content [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2009, 75(3): 420-427