

流化床气流超微粉碎对马铃薯淀粉结构及性质的影响

郎双静, 于仕博, 侯越, 王立东

Effect of Fluidized Bed Jet Milling on Structure and Properties of Potato Starch

LANG Shuangjing, YU Shibo, HOU Yue, and WANG Lidong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022060032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

油炸对马铃薯淀粉特性的影响

Effect of high temperature frying on the structure and properties of potato starch

食品工业科技. 2018, 39(1): 6-10 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.01.002>

不同DE值马铃薯淀粉基脂肪模拟物性质研究

Study on characteristics of potato starch based fat mimics with different DE values

食品工业科技. 2018, 39(11): 6-11 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.11.002>

超声处理对小米淀粉结构及理化性质的影响

Effects of Ultrasonic Treatment on the Structure and Physicochemical Properties of Millet Starch

食品工业科技. 2021, 42(24): 60-67 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040127>

超微粉碎处理对木薯淀粉结构及消化特性的影响

Effect of Micronization on the Structure and Digestibility of Tapioca Starch

食品工业科技. 2019, 40(7): 30-34, 40 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.07.006>

高速射流对木薯淀粉结构和性能的影响

Effect of high speed jet on structure and properties of tapioca starch

食品工业科技. 2018, 39(2): 56-60 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.02.011>

结冷胶对马铃薯淀粉回生特性的影响

Effect of gellan gum on retrogradation properties of potato starch

食品工业科技. 2017(16): 55-59 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.16.011>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郎双静, 于仕博, 侯越, 等. 流化床气流超微粉碎对马铃薯淀粉结构及性质的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 89–96. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060032

LANG Shuangjing, YU Shibo, HOU Yue, et al. Effect of Fluidized Bed Jet Milling on Structure and Properties of Potato Starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 89–96. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060032

· 研究与探讨 ·

流化床气流超微粉碎对马铃薯淀粉结构及性质的影响

郎双静¹, 于仕博¹, 侯 越², 王立东^{1,3,*}

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;

2. 黑龙江赫益乳业科技有限公司, 黑龙江大庆 163000;

3. 国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319)

摘要: 为研究流化床气流超微粉碎对淀粉结构及性质的影响, 以马铃薯淀粉为原料, 采用激光粒度分析仪、扫描电子显微镜、光电子能谱仪、同步热分析仪、流变仪等多种仪器及分析手段, 考察气流粉碎对马铃薯淀粉颗粒大小及形貌、表面基团、热稳定性、流变特性、溶解度、膨胀度及透明度等结构及性质的影响。结果表明: 马铃薯原淀粉经气流粉碎微细化处理后, 平均粒径 (D_{50}) 减小至 $13.59\pm0.04\text{ }\mu\text{m}$; X 射线光电子能谱 (XPS) 的谱图中没有出现新元素峰位, 淀粉颗粒表面没有引入新元素; 直链淀粉含量增加, 支链淀粉分子链变短, 溶解度、膨胀度和淀粉糊透明度增加; 粘性阻力减小, 表观粘度降低; 淀粉分子氢键及分子链均发生断裂, 凝沉性下降, 该研究为马铃薯淀粉的深度加工与应用提供了理论依据及技术支撑。

关键词: 马铃薯淀粉, 流化床气流超微粉碎, 结构, 理化性质

中图分类号: TS202.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)07-0089-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060032

本文网刊:



Effect of Fluidized Bed Jet Milling on Structure and Properties of Potato Starch

LANG Shuangjing¹, YU Shibo¹, HOU Yue², WANG Lidong^{1,3,*}

(1. College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2. Heilongjiang Heyi Dairy Technology Co., Ltd., Daqing 163000, China;

3. National Coarse Cereals Engineering Research Center, Daqing 163319, China)

Abstract: The structure and properties of potato starch were investigated after superfine grinding with a fluidized bed jet mill. The particle size, granular morphology, functional groups, rheological property, thermal and physicochemical properties of the potato starch were characterized using laser particle size analyzer (LPA), scanning electron microscopy (SEM), X-ray photoelectron spectrometer (XPS), simultaneous thermal analyzer and rheometer. It was found that the particle size of potato starch was significantly decreased to $13.59\pm0.04\text{ }\mu\text{m}$ after superfine grinding. There was no new element peak in the spectrum of X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), no new elements were introduced on the surface of starch granules. The amylose content increased, the molecular chain of amylopectin shortened, and the solubility, swelling degree and transparency of starch paste increased. The viscosity resistance decreases, and the apparent viscosity decreased. The hydrogen bonds and molecular chains of starch molecules were broken, and the retrogradation decreased. This study provides a theoretical basis and technical support for improving deep exploitation and utilization of potato starch.

收稿日期: 2022-06-05

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目 (LH2020C087); 黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目 (YJSCX2022-Y49)。

作者简介: 郎双静 (1980-), 女, 硕士, 实验师, 研究方向: 农产品精细化加工与利用, E-mail: 52667531@qq.com。

* 通信作者: 王立东 (1978-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 淀粉资源深度开发与利用和谷物健康食品的研究与开发, E-mail: wanglidong-521@163.com。

Key words: potato starch; fluidized bed jet milling; structure; physical and chemical properties

淀粉在自然界中广泛存在,是各种植物中重要的贮藏多糖^[1]。其是由 α -1,4 和 α -1,6 两条糖苷键与 D-吡喃葡萄糖相互连接而形成的水不溶性葡聚糖,主要由直链淀粉和支链淀粉两种组分构成,且直链淀粉和支链淀粉的含量决定了淀粉的性质^[2]。淀粉分子中羟基含量丰富,导致分子内部富含氢键,易形成多晶体结构^[3]。马铃薯是许多高产品种的重要植物淀粉来源。与其他植物淀粉相比,马铃薯淀粉具有更高的峰值粘度和更好的糊透明度,同时具有粉体颗粒大、黏度大、透明度高、膨胀效果好、易糊化、不易老化等独特性能,因此在食品工业中得到广泛应用^[4-6]。且现阶段,马铃薯淀粉成为主要改性淀粉原材料,人们通过利用物理、化学和生物等方法对马铃薯淀粉进行改性,并对其理化性质和结构进行分析研究,增强或改变其性能,赋予马铃薯淀粉新的功能特性,使其在多个领域内符合生产、应用需要^[7-8]。

气流超微粉碎被归类为流体能量冲击粉碎处理技术,通常用于生产超细粉末^[9]。该技术也常用于粉体微细化处理中,是一种较为高效的物理改性方法。气流粉碎机粉碎获得的产品粒径较小,其粒度范围一般在 5~15 μm 之间^[10-11]。史德芳等^[12]通过气流粉碎处理方式实现了香菇柄细胞级粉碎,处理后的香菇柄多糖溶出率较原料提高 1 倍;杨春瑜等^[13]利用气流粉碎黑木耳,经气流粉碎后的黑木耳微粉中蛋白的溶出率较原料提高 2~3 倍;Wang 等^[14]利用气流粉碎玉米淀粉,得到了经微细化处理后的玉米淀粉微观结构、糊化温度、重结晶成核方式、老化速率等均发生改变。Muttakin 等^[15]利用气流粉碎处理脱脂大豆,经处理后的大豆微粉在持水性、持油性、溶解性上均显著增加。且研究表明,马铃薯淀粉经超微粉碎处理后,可以在一定程度上改善其理化性质,从而扩展其原料的用途。然而,目前采用气流超微粉碎技术处理马铃薯淀粉的研究报道较少,处理后马铃薯淀粉的理化性质及微观结构如何变化尚不清楚。且气流粉碎以净化后空气为粉碎动力,粉碎过程不会对产品造成污染,更不会出现局部过热现象,不仅能保持物料原有天然活性,还能满足药品、食品等行业加工高纯度的要求^[16]。

本课题组前期利用气流粉碎技术对“A”型晶体结构的天然玉米淀粉进行超微粉碎处理,发现超微粉碎处理改变了玉米淀粉结构及理化特性^[14]。本研究以“B”型晶体结构的天然马铃薯淀粉为原料,利用气流超微粉碎技术进行微细化处理,探究气流超微粉碎对马铃薯淀粉颗粒形貌、晶体结构、表面基团、热力学特性、流变特性、溶解度、冻融稳定性及透明度等结构和理化性质的影响,为马铃薯淀粉物理改性技术研究及其在食品、医药等工业中的应用提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

食用马铃薯淀粉 一级品, 黑龙江裕雪淀粉有限公司; 直链淀粉标品 分析纯(纯度 99%), Sigma-aldrich; NaOH(纯度 96%)、HCl(37%)、无水乙醇(纯度 99.7%)、H₂SO₄(纯度 98%) 分析纯, 辽宁泉瑞试剂有限公司。

气流粉碎机组、LHL 中试型流化床式 山东潍坊正远粉体工程设备有限公司; BetterSize2000 激光粒度分布仪 丹东市百特仪器有限公司; S-3400N 扫描电子显微镜(SEM) 日本 HITACHI; ESCALAB250Xi X 光电子能谱仪(XPS) 美国 Thermo Fisher Scientific; RS6000 流变仪 德国 HAAKE; SDT-Q600 同步热分析仪 美国 TA 仪器公司; TU-1800 紫外可见分光光度计 北京普析仪器公司。

1.2 实验方法

1.2.1 微细化马铃薯淀粉的制备 以马铃薯淀粉为原料,利用流化床气流粉碎机组制备超微粉。进料量 1.0 kg, 粉碎气体压力 0.8 MPa, 粉碎时间 2.0 h, 在不同分级转速(1800、2400、3000、3600 和 3900 r/min) 条件下获得不同粒度微细化淀粉样品, 备用。

1.2.2 淀粉粒度测定 采用激光粒度仪测定淀粉粒度,方法参照王立东等^[17]的方法并稍作调整,以蒸馏水为分散剂,放置于超声仪中 5 min, 电脑检测结果。

1.2.3 淀粉颗粒 SEM 观察 测定方法参照 Liu 等^[18]的方法并稍作调整,取适量淀粉样品,均匀放置在涂有导电胶样品台上,喷金处理后置于 SME 下观察,选择不同放大倍数下观察。

1.2.4 淀粉颗粒 XPS 测定 测定方法参照 Yuan 等^[19]的方法并稍作调整,选用 Al-K α 线: 1486.6 eV, 0.8 eV 线宽, 真空度 5×10^{-9} Pa, 发射电压 15 kV, 功率 150 W, 以结合能为 284.6 eV C1s 峰为标准进行能量校正, 干燥至恒重后惰性气体保护, 用双面胶(普通/导电胶)将样品粘至样品台上。

1.2.5 淀粉的溶解度和膨胀度测定 测定方法参照董吉林等^[20]的方法并稍作调整, 1 g 样品与 50 mL 蒸馏水均匀混合, 不同温度糊化处理后冷却至室温。4000 r/min 条件下离心 10 min, 将上清液吸取至铝箔中, 干燥箱中烘干至恒重后称重, 上清液干燥后重与淀粉干重之比即为溶解度。计算公式如式(1)和(2)所示:

$$S(\%) = \frac{M_3 - M_2}{M_1} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

$$B(\%) = \frac{M_4}{M_1 \times (1 - S)} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

式中: S—溶解度(%); M₁—样品重量(g); M₂—铝箔重量(g); M₃—上清液干基与铝箔总质量(g);

B—膨胀度(%)；M₄—沉淀物干基重量(g)。

1.2.6 淀粉的热稳定性 参考 Dochia 等^[21]的方法, 使用同步热分析仪进行测定, 测试条件: 分别称取 10.0 mg(干基)淀粉样品于坩埚中, 气体气氛为空气, 气体流量为 100 mL/min, 实验温度范围为 30~800 °C, 氮气为保护气体, 输出热重曲线(TG)。

1.2.7 淀粉的流变性测试 方法参考 Xia 等^[22]的方法并稍作调整, 称取马铃薯淀粉, 配制成 10% 的淀粉乳液, 充分搅拌后沸水浴糊化处理, 使用流变仪对样品进行流变特性测定, 设置剪切速范围为 0.01~100 s⁻¹。

1.2.8 淀粉的凝沉性测定 参照李真等^[23]的方法并做适当调整, 取 0.30 g 马铃薯淀粉样品于带有刻度的 50 mL 试管中, 加入蒸馏水配制成 1%(m/v)淀粉乳液, 置于沸水浴中搅拌至充分糊化, 冷却至室温后, 观察 24 h 内淀粉糊上清液体积变化, 每 4 h 记录一次。

1.2.9 淀粉的透明度测试 参考张杰^[24]的方法并稍做调整, 配制浓度为 1%(w/v)不同粒度梯度淀粉乳液, 置于沸水浴中充分糊化后冷却至室温, 室温下贮藏 72 h, 以蒸馏水为参比, 在 640 nm 波长下, 每隔 12 h 使用紫外可见分光光度计测定淀粉乳透光率。

1.3 数据处理

试验结果为三次测量平均值, 结果以平均数±标

准差表示。采用 Originlab8.5 和 Design-Expert 软件对实验结果进行绘图, 采用 SPSS22、Minitab19 软件进行数据处理和 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 淀粉粒度分析

由表 1 中可以看出, 天然马铃薯淀粉在 D₅₀ 水平上的颗粒直径为 39.75±0.07 μm, 在分级转速 3000 r/min 时, 马铃薯淀粉颗粒直径达到最小值, D₅₀ 水平上的粒径为 13.59±0.04 μm。超微粉碎有效降低了马铃薯淀粉颗粒直径, 但随分级转速增加, 颗粒直径出现了增大的趋势。原因是当淀粉颗粒在低分级转速下, 淀粉分子有效碰撞几率小, 粉碎不完全, 颗粒直径相对较大。但随着分级转速增加, 淀粉颗粒在气流粉碎机粉碎腔体中动能加大, 颗粒之间有效碰撞、剪切、摩擦概率增加, 颗粒直径减小。但随着分级转速的持续增加, 颗粒直径减小速率变慢, 且出现小颗粒附着大颗粒表面, 出现团聚现象, 使颗粒直径出现了增大的趋势。曹英等^[25]通过超微粉碎机处理木薯淀粉得出与本实验一致的研究结果。

2.2 颗粒形貌分析

马铃薯淀粉扫描电镜形态如图 1 所示, 天然马铃薯淀粉颗粒(图 1a0、图 1a1)多为卵形或球形, 表面光滑, 颗粒完整, 粒径较大。1800、2400 r/min 转

表 1 不同分级转速马铃薯淀粉粒径大小

Table 1 Potato starch particle size at different grading speeds

分级转速(r/min)	0	1800	2400	3000	3600	3900
D ₅₀ (μm)	39.75±0.07 ^a	19.60±0.03 ^b	18.85±0.05 ^c	13.59±0.04 ^f	14.64±0.06 ^e	15.43±0.05 ^d

注: 同行字母不同表示差异显著(P<0.05)。

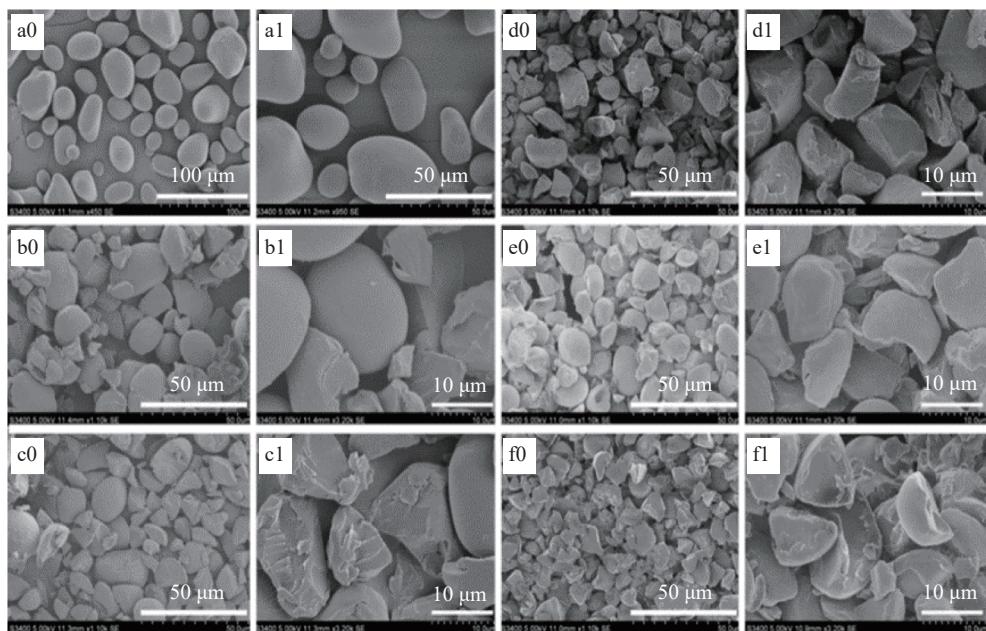


图 1 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉的扫描电镜图

Fig.1 Scanning electron micrographs of native and jet milled potato starch

注: 图 a~f 分别为分级转速为 0、1800、2400、3000、3600 和 3900 r/min 超微粉碎处理得到的淀粉; 0、1 表示不同放大倍数下超微粉碎处理得到的淀粉。

速时(图 1b~图 1c), 马铃薯淀粉颗粒发生破碎, 颗粒形貌表面变得粗糙, 出现棱角和裂纹, 但仍有部分淀粉颗粒保持卵型形态, 颗粒尺寸减小; 3000 r/min 时(图 1d0、图 1d1), 淀粉破损能度加剧, 颗粒完整度降低, 绝大部分颗粒发生破碎, 颗粒变的无规则且表面粗糙, 部分细小颗粒从大颗粒表面剥落。3600、3900 r/min 时(图 1e~图 1f), 淀粉颗粒破碎程度较大且呈现不规则海绵状, 部分细微颗粒黏附在小颗粒表面^[26]。气流粉碎破坏了马铃薯淀粉整体颗粒结构, 改变淀粉颗粒大小, 增大颗粒比表面积。

2.3 XPS 分析

为探讨超微粉碎对马铃薯淀粉本身化学组成的影响, 采用 XPS 检测马铃薯淀粉中 C、O 元素相对含量变化特征。

如图 2 所示马铃薯淀粉主要含有 C、O、H 三种元素, 因而图 2(a)上出现明显的 O1s 和 C1s 峰, 其中 C、O 元素可以通过 XPS 检测出^[27~29]。由表 2 所示, 超微粉碎处理后, C-C(C-H)和 O=C-OH 峰面积百分比均不断下降, 说明部分 C-H 和 O=C-OH 键发生断裂。冲击作用导致氢键断裂, 羟基含量增加。马

铃薯淀粉分子内碳、氧元素相对含量未发生变化, 也没有出现新的元素峰位, 说明气流粉碎仅破坏了马铃薯淀粉表面形貌和晶体结构, 并没有改变马铃薯淀粉其本身的化学组成。

表 2 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉 O/C 元素比和 C1s 峰面积百分比

Table 2 Analysis of O/C ratios and C1s peaks of native and jet milled potato starch

分级转速(r/min)	O/C	C-C(C-H)(%)	C-O(%)	C=O(%)	O=C-OH(%)
0	0.46	44.22	33.80	12.48	9.51
1800	0.48	41.77	34.06	15.39	8.78
2400	0.51	38.17	37.25	16.81	7.78
3000	0.52	35.19	39.80	18.52	6.49
3600	0.55	31.97	42.26	19.82	5.96
3900	0.57	31.48	44.69	19.07	4.75

2.4 溶解度和膨胀度分析

从图 3 可以看出, 在较低温(20 °C)条件下时, 马铃薯原淀粉样品表现出较差溶解度, 随着温度升高, 马铃薯原淀粉溶解度逐渐增大。经气流粉碎处理后, 不同粉碎程度的马铃薯淀粉溶解度随分级转速的升

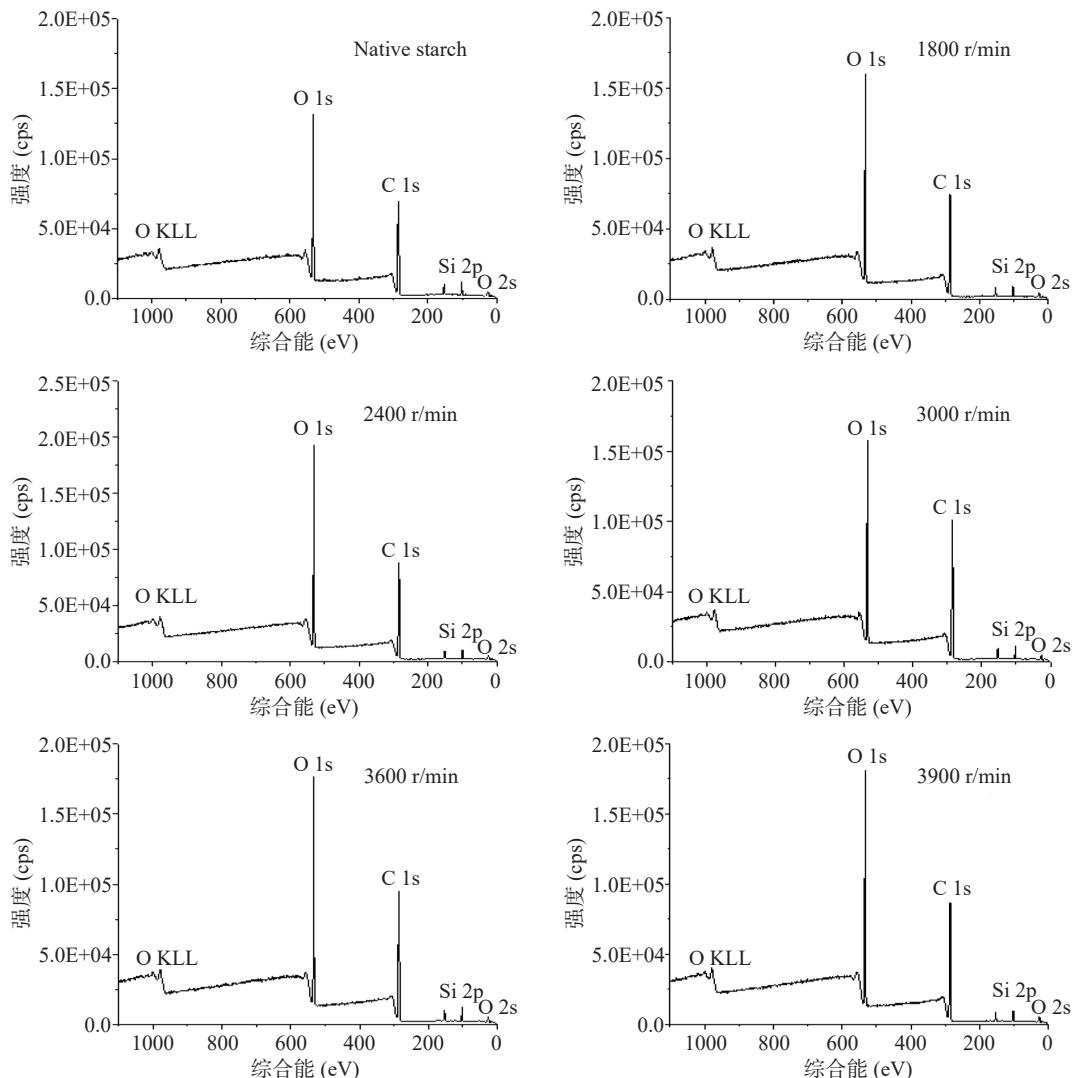


图 2 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉的 XPS 光谱图

Fig.2 XPS of native and jet milled potato starch

高而增大。涂政等^[30]研究发现, 超微粉碎处理后的红茶粉溶解度得到显著提升。从图 4 可以看出, 马铃薯原淀粉也同样表现出较差的膨胀度, 随温度升高, 膨胀度逐渐增大。经气流粉碎处理后, 马铃薯淀粉的膨胀度与颗粒直径、温度均成正相关趋势, 膨胀度较原淀粉增加 1.42 倍。此研究结果与张雪等^[31]所得结果一致, 但与史早等^[32]所得结果相反。原因可能为马铃薯淀粉内部结构较弱, 许多相互排斥的磷酸基团电荷存在于马铃薯淀粉分子结构中, 磷酸基团能促进淀粉膨胀, 淀粉颗粒结构遭到气流粉碎作用的破坏, 大量磷酸基团暴露出来导致淀粉膨胀度增加^[33]。

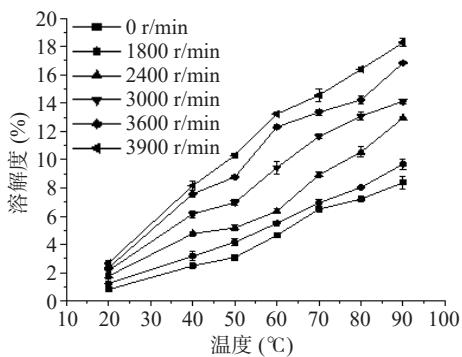


图 3 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉的溶解度
Fig.3 Solubility of native and jet milled potato starch

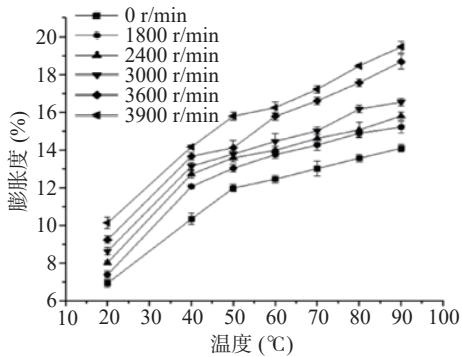


图 4 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉的膨胀度
Fig.4 Expansibility of native and jet milled potato starch

2.5 热稳定性分析

图 5 为天然马铃薯淀粉的热重曲线和气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉热重曲线。可以看出马铃薯原淀粉与各粒径梯度微细化淀粉 TG 曲线基本重合, 室温至 147 °C 是水分蒸发和少量小分子量碳氢化合物的产生阶段, 此阶段热重曲线显示出轻微重量损失, 随着分级转速增加, 失重率出现明显下降趋势; 300~500 °C, 快速热解阶段, 该阶段马铃薯淀粉中的纤维素、半纤维素及部分木质素的热分解成为该阶段失重的主要原因^[34], 此阶段失重率约占 60%, 不同分级转速的马铃薯淀粉存在相同的趋势; 500~800 °C, 淀粉分解碳化过程, 此阶段失重速率较慢。当分级转速为 3600 r/min 和 3900 r/min 时, 失重率小于天然马铃薯淀粉, 原因可能是小分子颗粒由于静电力作用附着在大颗粒表面, 形成非共价键大分子,

导致碳化并不完全, 质量残余率较大。当分级转速为 1800~3000 r/min 时, 淀粉失重率大于天然马铃薯淀粉, 原因为气流粉碎处理后的马铃薯淀粉, 比表面积增大, 更易碳化, 质量残余率更小。金顶峰等^[35]的研究结果与本研究结果一致。

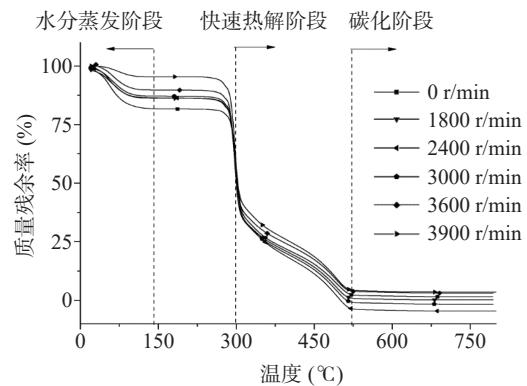


图 5 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉热重分析曲线
Fig.5 Typical TG diagram of native and jet milled potato starch

2.6 流变学特性分析

气流粉碎前后马铃薯淀粉流变测定结果由图 6 所示, 天然马铃薯淀粉糊流变曲线随着剪切速率的增大逐渐向剪切应力轴弯曲, 说明马铃薯淀粉糊属于假塑性流体。气流粉碎处理后, 不同粒度的微细化淀粉保持与天然淀粉相同的屈向性, 流体类型未发生变化。如表 3 可以看出, 决定系数 R^2 介于 0.9894~0.9971 之间, 表明马铃薯淀粉糊流变特性曲线拟合良好。随着分级转速增加, 稠度系数 K 发生急剧下降, 流动系

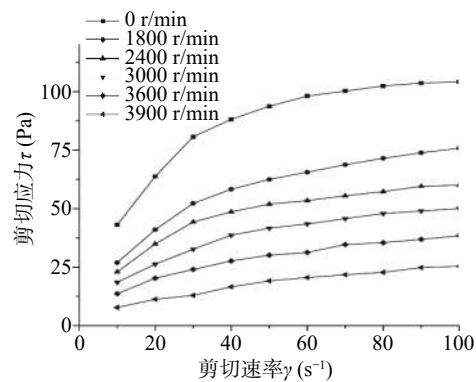


图 6 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉糊的流变特性
Fig.6 Rheological characteristics of native and jet milled potato starch

表 3 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉流变参数

Table 3 Rheological parameters of native and jet milled potato starch

分级转速(r/min)	稠度系数K	流动系数m	决定系数R ²
0	87.49	0.2717	0.9894
1800	46.69	0.3494	0.9907
2400	35.25	0.3862	0.9922
3000	27.12	0.4129	0.9952
3600	19.69	0.4761	0.9966
3900	15.37	0.5154	0.9971

数虽上升但小于1,说明淀粉糊逐步向牛顿流体转变。

对气流粉碎前后马铃薯淀粉样品进行剪切稀化测试,从图7中可以看出,天然马铃薯淀粉表观黏度随剪切速率的增加急剧下降,然后趋于平缓,说明存在剪切稀化现象。但在相同剪切速率下,随着分级转速的增加,淀粉糊的表观粘度值不断下降,对流动产生的粘性阻力减小,导致表观黏度降低,并随着气流粉碎进程而持续降低。

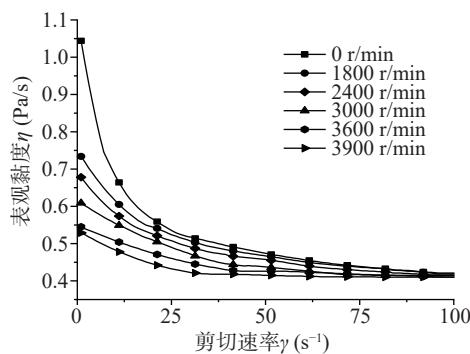


图7 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉糊表观黏度变化

Fig.7 Apparent viscosity characteristics of native and jet milled potato starch

2.7 凝沉性分析

如图8所示,马铃薯淀粉的凝沉性随贮藏时间的延长而逐步增大,12 h后逐步趋于稳定。不同分级转速的微细化马铃薯淀粉的凝沉性与天然马铃薯淀粉具有同样的趋势。在相同贮藏时间下,微细化马铃薯淀粉的凝沉速率低于天然马铃薯淀粉,且随着分级转速的增加,马铃薯淀粉凝沉性呈明显下降趋势,在3600 r/min时马铃薯淀粉较原淀粉的凝沉性下降2.07倍。此研究结果与逮蕾等^[36]的研究结果不一致,原因是气流粉碎使马铃薯淀粉的分子链链长逐渐变短,过短的分子链导致其更易扩散,使得凝沉性变差。

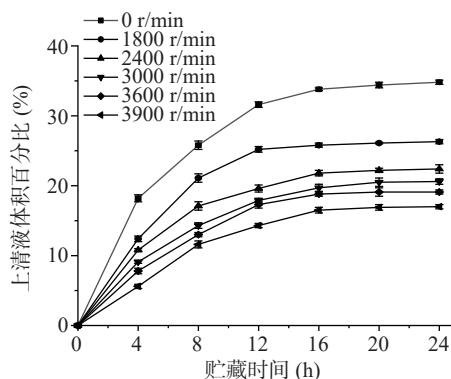


图8 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉凝沉性

Fig.8 Coagulation of native and jet milled potato starch

2.8 透明度分析

淀粉糊透明度的大小反映了淀粉分子与水结合能力的高低,体现淀粉颗粒受到破坏的程度。由图9可以看出,天然马铃薯淀粉糊的透明度相对较

低,且随贮藏时间的增加逐步降低,并最终趋于稳定。这是由于淀粉分子间大量磷酸基的存在起到阻止淀粉分子间和分子内氢键的缔合作用,影响光的吸收与折射^[37]。气流粉碎处理后,淀粉糊透明度随粉碎程度的增大而增大,因为分级转速越大,马铃薯淀粉晶体结构和颗粒形态受到的破坏越严重(此研究结果在2.2扫描电子显微镜结果中可以看出),导致游离水更易进入淀粉分子内部,促进淀粉分子与水分子结合,导致透明度增加,这与丁金龙等^[38]的研究结果一致。

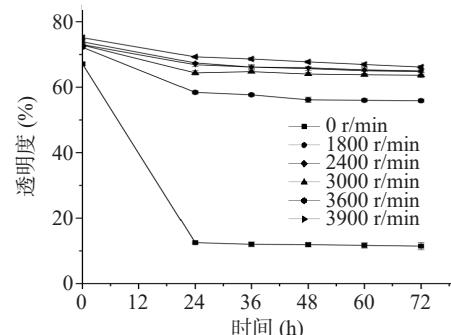


图9 气流超微粉碎处理前后马铃薯淀粉的透明度

Fig.9 Transparency of native and jet milled potato starch

3 结论

马铃薯淀粉经气流超微粉碎处理后,颗粒形貌呈不规则形状,表面粗糙,且出现较多棱角和裂纹,随着分级转速增加粒径减小且无规则;淀粉粒径 D_{50} 从 $39.75 \pm 0.07 \mu\text{m}$ 降低至 $13.59 \pm 0.04 \mu\text{m}$; XPS 谱图中未出现新峰,证明粉碎后马铃薯淀粉表面没有新的元素被引入, C-C(C-H) 和 O=C-OH 两个峰面积下降,气流粉碎强大的机械力作用导致淀粉分子中氢键断裂,同时导致部分 C-H 和 O=C-OH 键发生断裂。淀粉支链分子链断裂,游离水更易进入淀粉颗粒内部,使得溶解度、膨胀度和淀粉糊透明度随分级转速的增加而显著增大。淀粉分子的链长逐渐变短,更易扩散,凝沉性下降。由于气流超微粉碎产生的静电力作用,导致小颗粒附着至大颗粒表面形成非共价键大分子颗粒,导致 3600、3900 r/min 的马铃薯淀粉热稳定性高于原淀粉;淀粉表观粘度值随分级转速的增加而降低,流动的粘性阻力减小。综上所述,气流超微粉碎技术显著改善了马铃薯淀粉的理化特性和加工特性,为马铃薯淀粉物理改性技术研究及其在食品、医药等工业中的应用提供技术参考。

参考文献

- [1] GUJRAL H, SINHMAR A, NEHRA M, et al. Synthesis, characterization, and utilization of potato starch nanoparticles as a filler in nanocomposite films[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 186: 155–162.
- [2] 韩文芳, 林亲录, 赵思明, 等. 直链淀粉和支链淀粉分子结构研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 267–275. [HAN Wenfang, LIN Qinlu, ZHAO Siming, et al. Research progress on molecular structure of amylose and amylopectin[J]. Food Science, 2020, 41(13): 267–275.]

- (13): 267–275.]
- [3] 唐诗, 赵晶晶, 苏婷婷, 等. 不同直链含量热塑性淀粉的制备及性能研究[J]. 中国塑料, 2021, 35(6): 7–12. [TANG Shi, ZHAO Jingjing, SU Tingting, et al. Preparation and properties of thermoplastic starch with different amylose content[J]. China Plastics, 2021, 35(6): 7–12.]
- [4] 刘思迪, 王百龙, 黄敏丽, 等. 淀粉-蛋白混合体系的制备、理化特性及应用研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 345–352. [LIU Sidi, WANG Bailong, HUANG Minli, et al. Research progress in the preparation, physical and chemical properties and application of starch protein mixed system[J]. Food Science, 2022, 43(1): 345–352.]
- [5] DA C, FANG F, ENRICO F, et al. Rheology, microstructure and phase behavior of potato starch-protein fibril mixed gel[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 239: 116247.
- [6] 王立东, 肖志刚. 气流粉碎对玉米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 276–281. [WANG Lidong, XIAO Zhigang. Effect of jet milling on the structure and physicochemical properties of corn starch[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2016, 32(24): 276–281.]
- [7] DONG S, FANG G, LUO Z, et al. Effect of granule size on the structure and digestibility of jackfruit seed starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106964.
- [8] 李振, 王进, 付艳红, 等. 气流粉碎过程的选择性特征及其数值模拟[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 371–376. [LI Zhen, WANG Jin, FU Yanhong, et al. Selective characteristics and numerical simulation of pneumatic comminution process[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2016, 45(2): 371–376.]
- [9] PROTONOTARIOU S, DRAKOS A, EVAGELIOU V, et al. Sieving fractionation and jet mill micronization affect the functional properties of wheat flour[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 134: 24–29.
- [10] SHULI T, PENG W, LINJIE Z, et al. Experimental and numerical analysis of a lab-scale fluid energy mill[J]. *Powder Technology*, 2009, 195(1): 31–39.
- [11] 尚兴隆. 对喷式流化床气流粉碎与分级性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. [SHANG Xinglong. Study on the performance of jet flow pulverization and classification in jet fluidized bed[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.]
- [12] 史德芳, 周明, 郭鹏, 等. 气流和机械碾轧超微粉碎香菇柄的效果比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 280–286. [SHI Defang, ZHOU Ming, GUO Peng, et al. Comparison of the effects of airflow and mechanical milling on superfine crushing of *Lentinus edodes* stalk[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2012, 28(8): 280–286.]
- [13] 杨春瑜, 战丽, 夏文水, 等. 气流粉碎对黑木耳蛋白溶出率和富集规律的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 150–153. [YANG Chunyu, ZHAN Li, XIA Wenshui, et al. Effect of airflow pulverization on the dissolution rate and enrichment law of *Auricularia auricula* protein[J]. Food Science, 2008, 29(11): 150–153.]
- [14] WANG L, LI X, YU S, et al. Understanding the changes in particle size, structure, and functional properties of waxy maize starch after jet-milling treatments[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2021, 44(5): e13670.
- [15] MUTTAKIN S, KIM M S, LEE D U. Tailoring physicochemical and sensorial properties of defatted soybean flour using jet-milling technology[J]. *Food Chemistry*, 2015, 187: 106–111.
- [16] 段钧龄, 李春华. 超微提取当归阿魏酸工艺研究[J]. 亚太传统医药, 2011, 7(3): 32–34. [DUAN Junling, LI Chunhua. Study on ultra-fine extraction of ferulic acid from *Angelica sinensis*[J]. Asia Pacific Traditional Medicine, 2011, 7(3): 32–34.]
- [17] 王立东, 侯越, 刘诗琳, 等. 气流超微粉碎对玉米淀粉微观结构及老化特性影响[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 86–93. [WANG Lidong, HOU Yue, LIU Shilin, et al. Effect of airflow superfine pulverization on microstructure and aging characteristics of corn starch [J]. Food Science, 2020, 41(1): 86–93.]
- [18] LIU T Y, MA Y, YU S F, et al. The effect of ball milling treatment on structure and porosity of maize starch granule[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2011, 12(4): 586–593.
- [19] YUAN W J, QU L, LI J, et al. Characterization of crystalline SiCN formed during the nitridation of silicon and cornstarch powder compacts[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 725: 326–333.
- [20] 董吉林, 杨溢, 申瑞玲, 等. 燕麦淀粉-硬脂酸复合物的制备及其性质研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(5): 15–19. [DONG Jilin, YANG Yi, SHEN Ruiling, et al. Preparation and properties of oat starch stearic acid complex[J]. Grain and Oil, 2019, 32(5): 15–19.]
- [21] DOCHIA M, CHAMBRE D, GAVRILAȘ S, et al. Characterization of the complexing agents' influence on bioscouring cotton fabrics by FT-IR and TG/DTG/DTA analysis[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2018, 132: 1489–1498.
- [22] XIA T, GOU M, ZHANG G, et al. Physical and structural properties of potato starch modified by dielectric treatment with different moisture content[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 118(Pt B): 1455–1462.
- [23] 李真, 安阳, 艾志录, 等. 不同类型变性淀粉的理化特性比较[J]. 中国食品学报, 2019, 19(4): 280–286. [LI Zhen, AN Yang, AI Zhilu, et al. Comparison of physical and chemical properties of different types of modified starch[J]. Chinese Journal of Food, 2019, 19(4): 280–286.]
- [24] 张杰. 黑米淀粉的理化性质及湿热处理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019. [ZHANG Jie. Study on physicochemical properties and hydrothermal treatment of black rice starch[D]. Nanning: Guangxi University, 2019.]
- [25] 曹英, 夏文, 李积华, 等. 超微粉碎处理对木薯淀粉结构及消化性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(7): 30–34, 40. [CAO Ying, XIA Wen, LI Jihua, et al. Effects of ultra-fine pulverization on the structure and digestive characteristics of cassava starch[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(7): 30–34, 40.]
- [26] 王永强, 王成端. 气流粉碎机动态参数对粉碎效果影响的研究[J]. 中国粉体技术, 2003(2): 20–24. [WANG Yongqiang, WANG Chengduan. Study on the influence of dynamic parameters of pneumatic crusher on crushing effect[J]. China Powder Technol-

- ogy, 2003(2): 20–24.]
- [27] MING L, PENG L, WEI Z, et al. Extrusion processing and characterization of edible starch films with different amylose contents[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 106(1): 95–101.
- [28] SCOTT L, BORISSOVA A, BURNS A, et al. Effect of grinding nozzles pressure on particle and fluid flow patterns in a spiral jet mill[J]. *Powder Technology*, 2021, 394: 439–447.
- [29] 张阳, 肖卫华, 纪冠亚, 等. 机械超微粉碎与不同粒度常规粉碎对红茶理化特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(11): 295–301. [ZHANG Yang, XIAO Weihua, JI Guanya, et al. Effects of mechanical superfine comminution and conventional comminution with different particle sizes on physical and chemical properties of black tea[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2016, 32(11): 295–301.]
- [30] 涂政, 林家正, 褚飞洋, 等. 不同粒径超微红茶粉体冷藏特性及降脂功效[J]. *食品科学*, 2022, 43(5): 111–117. [TU Zheng, LIN Jiazheng, CHU Feiyang, et al. Cold storage characteristics and lipid-lowering effect of ultra-fine black tea powder with different particle sizes[J]. *Food Science*, 2022, 43(5): 111–117.]
- [31] 张雪, 邹建, 候银臣, 等. 酸枣仁、小米、怀山药超微混合品质和糊化特性的研究[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(6): 15–19. [ZHANG Xue, ZOU Jian, HOU Yinchen, et al. Study on the quality and gelatinization characteristics of ultra-fine mixed powder of wild jujube kernel, millet and Huaishan yam[J]. *Grain and Oil*, 2019, 32(6): 15–19.]
- [32] 史早, 张甫生, 杨金来, 等. 超微粉碎对方竹笋全粉理化特性及微观结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(24): 40–47. [SHI Zao, ZHANG Pusheng, YANG Jinlai, et al. Effect of superfine grinding on physicochemical properties and microstructure of bamboo shoot powder[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2021, 42(24): 40–47.]
- [33] 郭泽镔. 超高压处理对莲子淀粉结构及理化特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2014. [GUO Zebin. Study on the effect of ultra-high pressure treatment on the structure and physicochemical properties of lotus seed starch[D]. Fuzhou: Fujian agriculture and Forestry University, 2014.]
- [34] KUMAR A, WANG L, DZENIS Y A, et al. Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 32(5): 460–467.
- [35] 金顶峰, 杨潇, 吴盼盼, 等. 多孔玉米淀粉热分解反应动力学[J]. *高校化学工程学报*, 2015, 29(6): 1371–1376. [JIN Dingfeng, YANG Xiao, WU Panpan, et al. Kinetics of thermal decomposition reaction of porous corn starch[J]. *Journal of Chemical Engineering of Colleges and Universities*, 2015, 29(6): 1371–1376.]
- [36] 逯蕾, 韩小贤, 郑学玲, 等. 球磨对绿豆淀粉颗粒形态和理化性质的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2015(1): 33–38. [LU Lei, HAN Xiaoxian, ZHENG Xueling, et al. Effect of ball milling on morphology and physicochemical properties of mungbean starch granules[J]. *Grain and Feed Industry*, 2015(1): 33–38.]
- [37] 夏天雨. 射频/微波韧化处理对马铃薯淀粉结构及理化特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019. [XIA Tianyu. Effect of RF/microwave toughening treatment on the structure and physicochemical properties of potato starch[D]. Yangling: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2019.]
- [38] 丁金龙, 孙远明, 杨幼慧, 等. 魔芋粉湿法微粉碎机械力化学效应研究[J]. *食品与发酵工业*, 2003(10): 11–14. [DING Jinlong, SUN Yuanming, YANG Youhui, et al. Study on mechano-chemical effect of konjac powder wet micro pulverization[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2003(10): 11–14.]