

微波间歇干燥对玉米籽粒中淀粉理化特性的影响

王新智, 王天池, 吴玉柱*, 刘景圣, 许秀颖, 赵城彬
(吉林农业大学食品科学与工程学院 小麦和玉米深加工国家工程研究中心 长春 130118)

摘要 为提高玉米干燥的速率,明确微波间歇干燥对玉米中淀粉的影响,以"吉农玉 719"为研究对象,对比自然干燥和不同微波功率密度条件下微波间歇干燥对玉米中淀粉加工和结构特性的影响。结果表明:与自然干燥的玉米相比,玉米经微波干燥,其淀粉的性质发生明显变化,微波功率密度在 0.9~3.6 W/g 范围内,玉米淀粉的峰值黏度和溶解度均呈先升高后降低的趋势,当微波功率密度为 1.8 W/g 时,淀粉的峰值黏度最高,溶解度最高。静态流变学结果表明:玉米经自然干燥和微波干燥,其淀粉凝胶均为假塑性流体。动态流变学结果表明:微波功率密度在 0.9~1.8 W/g 范围,微波作用可明显改善玉米淀粉凝胶的黏弹性,当微波功率密度为 1.8 W/g 时,淀粉凝胶的黏弹性最好;当微波功率密度高于 1.8 W/g 时,玉米淀粉凝胶的硬度显著增加;玉米经微波干燥,其淀粉的膨胀度、热焓值和有序度均降低,粒径增加。结论:在微波功率密度 1.8 W/g、微波时间 2 min、缓苏时间 4 min 条件下干燥得到的玉米淀粉特性最佳。

关键词 微波; 间歇干燥; 玉米; 淀粉; 加工特性; 结构特性

文章编号 1009-7848(2024)02-0179-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.02.017

玉米(*Zea mays* L.)是禾本科一年生草本植物,俗称苞谷、苞米棒子、玉蜀黍、珍珠米等。在全球主要作物中,玉米因用途广、种植简单等优势而使种植面积迅速扩大,目前成为世界第一大作物^[1-2]。玉米籽粒中含有丰富的淀粉、蛋白质、脂肪、维生素以及生物活性物质等。由于玉米资源丰富,为重要的粮、经、饲作物,因此被广泛用于食用、家畜饲养以及工业生产,例如生产玉米淀粉、酒精、生物油等加工^[3-4]。预计到 2025 年,玉米将成为产量最高的作物^[5]。

我国东北地区新收获玉米的含水率在 20%~35%,为防止霉变,便于储藏,需将玉米干燥至安全水分(湿基低于 14%)^[6-7]。水是霉菌、细菌和真菌生长的中心,也是食物中所含酶活性的重要因素,含水量高利于微生物繁殖,易使玉米霉变,不利于长期保存。干燥是抑制霉菌发育,防止玉米变质的最主要的措施。干燥的目的是减少谷物和食品的水分含量,以消除其负面影响^[8-9]。目前,还有许多地区将收获后的玉米通过自然晾晒去除水分,这

种干燥方式时间长,易受天气影响、占用场地大,易使玉米产生大量霉变。采用先进的干燥技术是确保粮食安全的重要手段,能更好地保证玉米的内在品质。微波干燥作为一种容积式加热方式,具有生产效率高、成本低、易控制等优势。微波作用使谷物和食品产生的热量主要是由偶极子旋转主导内部产热^[10-11]。

目前,谷物应用微波干燥的研究很多,如 Shen 等^[10]研究了微波干燥对发芽糙米品质的影响,发现高微波强度导致 γ -氨基丁酸降解,64~67 °C 可以保持较高的 γ -氨基丁酸含量。Amna 等^[12]研究了微波干燥对青豆干燥特性和色泽的影响,发现微波干燥后青豆的 a^* 值增加, L^* 和 b^* 值下降。韦珍珍等^[13]研究了微波干燥对月柿果片品质的影响,发现微波干燥后月柿果片的硬度增加,随着微波功率的增加,月柿果片的复水比呈先上升后下降的趋势。综上所述,微波干燥虽然对粮食和果蔬品质、色泽等具有重要影响,但微波干燥对玉米籽粒加工特性的研究较少。淀粉是玉米中的主要营养成分,直接决定玉米的品质。微波功率密度是影响玉米中淀粉品质的主要因素。本试验研究微波功率密度对玉米中淀粉理化性质的影响,旨在为玉米微波干燥产业化应用和玉米深加工提供数据支持。

收稿日期: 2023-02-21

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20210101043JC);财政部和农业农村部:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-02-38)

第一作者: 王新智,男,硕士生

通信作者: 吴玉柱 E-mail:wo_shiwuyuzhu@163.com

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

试验用玉米“吉农玉 719”产自于吉林省公主岭市,试验时玉米的水分质量分数为(24±2)%。亚硫酸氢钠(分析纯级),北京化工厂;溴化钾(分析纯级),美国 Sigma 公司;总淀粉试剂盒,爱尔兰 Megazyme 公司。

1.2 仪器与设备

MDC-9-R2-9 型微波-热风联合干燥机,上海碧茵机电科技有限公司;3JK-1 型快速黏度分析仪,澳大利亚 Perten 公司;MCR-302 型流变仪,奥地利 Anton Paar 公司;TA-XTplus 型食品物性分析仪,英国 Stable Micro Systems 公司;Q-2000 型差示扫描量热仪,美国 TA 公司;VERTEX70 傅里叶红外光谱仪,德国 Bruker 公司;101A-3E 型电热鼓风干燥箱,上海实验仪器厂有限公司。

1.3 方法

1.3.1 玉米干燥试验

1.3.1.1 自然干燥 将玉米置于阳光充足的环境下晾晒,直至玉米水分含量降至(14±0.5)%。

1.3.1.2 微波干燥 采用精度为+0.05 g 的天平称取试验样品,干燥时微波功率密度分别为 0.9,1.8,2.7,3.6 W/g,采用间歇式干燥方式,微波作用 2 min 间歇 4 min,直至玉米水分含量降至(14±0.5)%,结束试验。此外,文章将出现样品缩写,如“MPD-1.8”,表明微波功率密度为 1.8 W/g。

1.3.2 玉米含水率的测定 按照 GB/T 10362-2008《粮油检验 玉米水分测定》的方法测定玉米的初始含水率。

参考张紫恒等^[14]的方法测定玉米的实时含水率 $[M_w]$,计算方法如下:

$$M_w(\%) = [1 - m_t \times (1 - M_0) / m_0] \times 100 \quad (1)$$

式中, m_t ——干燥 t 时间后玉米的质量,g;
 m_0 ——玉米的初始质量,g; M_0 ——玉米的初始含水率,%。

1.3.3 玉米淀粉的提取 参考曹勇等^[15]的方法并作部分改动。将 200 g 玉米籽粒浸泡在 20 °C 亚硫酸氢钠溶液(0.25%)中 48 h,剥去种皮和胚,按料水比为 1:2 进行湿磨,保留 100,200 目浆液,蒸馏水多次洗涤,室温下静置 4 h,除去上清液,沉淀物用蒸馏水重悬,并以 5 000 r/min 离心 20 min。除去

上层黄色物质并再离心 3 次。将分离出的淀粉在 40 °C(鼓风式干燥箱)中干燥 24 h。淀粉提取率为干淀粉质量与玉米籽粒质量的比值,纯度检验采用爱尔兰 Megazyme 公司试剂盒方法,测定总淀粉含量。

1.3.4 玉米淀粉糊化特性的测定 参考 Petcharat 等^[16]方法。采用 RVA 快速黏度分析仪,将 3 g 玉米淀粉倒入罐中,加入 25 mL 蒸馏水充分混合。将混合物以 960 r/min 转速搅拌 10 s,然后在其余分析过程中改为 160 r/min。测试程序:50 °C 下保持 1 min,再以 6 °C/min 的速率升至 95 °C,将温度保持在 95 °C 下 2.5 min,之后以 6 °C/min 的速率冷却至 50 °C 并保持 2 min。

1.3.5 玉米淀粉流变学特性的测定 参考张晶等^[17]的方法,将 RVA 糊化后的少量样品放入流变仪测定台,测试均采用 CP-50 锥形板(50 mm 直径和 1 mm 狭缝),间隙为 0.05 mm,板间温度均为 25 °C。

静态流变学:将样品从 0 s⁻¹ 到 300 s⁻¹ 逐步剪切,然后剪切速率从 300 s⁻¹ 降至 0 s⁻¹。测定剪切应力随剪切速率的变化。

动态流变学:角频率范围 0.1~100 rad/s,应变为 1%,测定储能模量(G')及损耗模量(G'')随角频率的变化。

1.3.6 玉米淀粉凝胶硬度的测定 参考周静宜等^[18]的方法。将 1.3.4 节制备的样品放入 4 °C 冰箱中保存 12 h,采用 TA-XT 物性仪测定凝胶的硬度,采用 P0.5 型探头,测试条件:测前速率为 1 mm/s,测试速率为 2 mm/s,测后速率为 2 mm/s,压缩率 60%,触发力 5 g,两次压缩时间为 5 s。

1.3.7 玉米淀粉溶胀度的测定 参考 Ko 等^[19]的方法。准确称取 0.5 g 淀粉,加入 25 mL 蒸馏水,将淀粉溶液放在 95 °C 水浴锅中水浴 25 min 并间歇振荡,将室温冷却处理后的样品以 3 000 r/min 离心 20 min,将上清液倒入铝盒中,105 °C 干燥 24 h,称其质量为 m_1 ,离心管中膨胀淀粉的质量为 m_2 ,计算公式如下:

$$S(\%) = 100m_1/m_0 \quad (2)$$

$$\text{膨胀度}(g/g) = m_2/m_0(1-S) \quad (3)$$

式中, S ——溶解度,%; m_0 ——淀粉质量,g;
 m_1 ——被溶解的淀粉质量,g; m_2 ——沉淀物质量,g。

1.3.8 玉米淀粉粒径分布的测定 参考薛艾莲等^[20]的方法,使用 BT-9300HT 型激光粒度仪测定玉米淀粉的粒径分布。

1.3.9 玉米淀粉热特性的测定 参考 Lutfi 等^[21]方法。在 DSC 铝盘中加入 3 mg 淀粉和 9 μ L 蒸馏水,密封后,将平底锅在室温下保持 24 h,热扫描从 30 $^{\circ}$ C 到 120 $^{\circ}$ C,加热速率为 10 $^{\circ}$ C/min,以空铝锅为参比。

1.3.10 玉米淀粉傅里叶红外光谱扫描(FT-IR)分析 参考 Su 等^[22]的方法,将淀粉与 KBr 以质量比 1:100 混合并研磨,放入模具中压制成片,以 KBr 为背景,使用傅里叶变换红外光谱仪来分析淀粉,扫描范围为 4 000~400 cm^{-1} ,使用 Omnic 8.2 对谱图进行基线校正,对 1 200~800 cm^{-1} 范围进行去卷积处理。

1.3.11 数据统计分析 运用 SPSS 软件处理数据,运用 Origin 软件进行绘图处理,显著水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 微波功率密度对玉米籽粒干燥特性的影响

微波功率密度是影响玉米干燥特性和品质的重要因素,由图 1 可知,微波功率密度越大,玉米干燥曲线的斜率越大,到达安全水分时间越短。微波功率密度为 0.9 W/g 时,玉米达到安全水分所需时间为 204 min,当微波功率密度为 1.8,2.7 W/g 和 3.6 W/g 时,干燥时间分别减少了 66.7%,84.3% 和 88.2%,表明增加微波功率密度可明显加快干燥过程。这些差异将对玉米干燥后的品质产生影响。

2.2 微波功率密度对玉米籽粒中淀粉提取率和总淀粉含量的影响

如表 1 所示,玉米经自然干燥后,其淀粉的提取率为 50.29%,玉米经微波干燥后,当微波功率密度为 0.9,1.8,2.7,3.6 W/g 时,玉米淀粉的提取率分别降低了 2.15%,2.9%,5.11%,5.44%,表明随着微波功率密的提高淀粉难以分离,对所有淀粉进行纯度检验,纯度均在 88% 以上。

2.3 微波功率密度对玉米籽粒中淀粉糊化特性的影响

淀粉的糊化特性是评价淀粉类食品加工特性

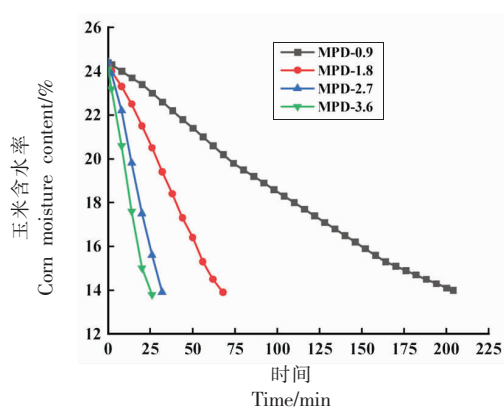


图 1 不同微波功率密度作用条件下对玉米含水率的影响

Fig.1 Effects of different microwave power densities on corn moisture content

表 1 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉的提取率和总淀粉含量

Table 1 Extraction rate and total starch content of corn starch under natural drying and different microwave power densities

样品	淀粉提取率/%	总淀粉含量/%
自然干燥	50.29 \pm 0.42 ^a	90.22 \pm 0.91 ^a
MPD-0.9	48.14 \pm 0.19 ^b	89.57 \pm 0.88 ^{ab}
MPD-1.8	47.39 \pm 0.34 ^c	89.18 \pm 0.90 ^{ab}
MPD-2.7	45.18 \pm 0.35 ^d	88.26 \pm 0.83 ^b
MPD-3.6	44.85 \pm 0.31 ^d	88.16 \pm 0.86 ^b

注:同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

的重要指标之一,峰值黏度反映淀粉与水的结合能力^[23],回生值反映淀粉凝胶的老化程度^[24]。如表 2 所示,与自然干燥的玉米相比,玉米经微波干燥后,其淀粉的峰值黏度均发生显著变化($P<0.05$),且随着微波功率密度的增加玉米淀粉的峰值黏度呈先升高后降低的趋势,微波功率密度为 1.8 W/g 时,峰值黏度最高,为 3 979 cP,微波功率密度为 3.6 W/g 时,峰值黏度最低,为 3 025 cP。可能由于微波功率密度在一定范围内(0.9~1.8 W/g),微波使玉米中淀粉颗粒膨胀,从而使淀粉颗粒表现为孔洞结构,这些孔洞会增强淀粉颗粒与水分子的结合能力,使淀粉颗粒更容易吸水膨胀,导致峰值黏度显著增加 ($P<0.05$)^[25],当微波功率密度达到 2.7 W/g 时,可能由于微波功率密度过高,玉米中水分子与淀粉颗粒之间发生剧烈摩擦和碰撞,使玉米在短时间内迅速升温,从而使淀粉颗粒造成

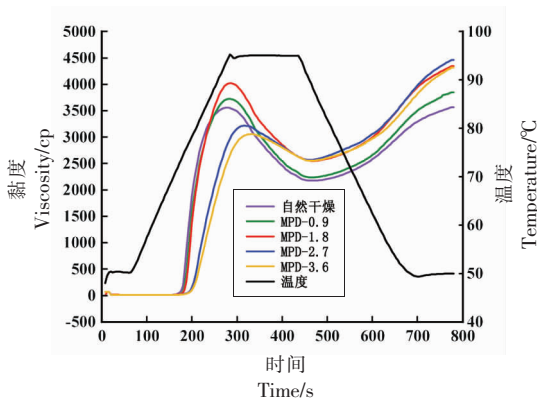


图2 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉的RVA糊化曲线

Fig.2 RVA gelatinization curves of corn starch under natural drying and different microwave power densities

严重损伤并破坏淀粉的分子结构,弱化淀粉分子间的相互作用力,导致玉米淀粉的峰值黏度显著降低($P<0.05$)^[26],随着微波功率密度继续升高,微波作用对淀粉的分子结构破坏程度越大,峰值黏度随之降低,这与Ma等^[26]的研究结果相符。淀粉凝胶的回生特性与直链淀粉和长链支链淀粉的含量有关,与自然干燥的玉米相比,玉米经微波干燥后,其淀粉的最终黏度和回生值均显著增加($P<0.05$),由于玉米经微波干燥后,玉米中长链支链淀粉部分分解,使直链淀粉含量增加,导致最终黏度和回生值增加^[27]。通过糊化特性的结果发现,一定范围内的微波功率密度可以提高淀粉的峰值黏度,进而使食品在加工时更易于成型。

表2 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉的RVA糊化特性参数

Table 2 RVA gelatinization parameters of corn starch under natural drying and different microwave power densities

样品	峰值黏度/cP	谷值黏度/cP	最终黏度/cP	回生值/cP	峰值时间/s	糊化温度/°C
自然干燥	3 549 ± 25 ^c	2 174 ± 12 ^d	3 564 ± 30 ^d	1 390 ± 18 ^c	4.64 ± 0.08 ^d	72.60 ± 0.10 ^d
MPD-0.9	3 726 ± 26 ^b	2 239 ± 10 ^c	3 844 ± 30 ^c	1 606 ± 20 ^d	4.76 ± 0.04 ^c	72.82 ± 0.25 ^d
MPD-1.8	3 979 ± 43 ^a	2 529 ± 21 ^b	4 307 ± 36 ^b	1 778 ± 15 ^b	4.76 ± 0.04 ^c	73.98 ± 0.44 ^c
MPD-2.7	3 204 ± 30 ^d	2 563 ± 12 ^a	4 445 ± 22 ^a	1 882 ± 12 ^a	5.28 ± 0.02 ^b	75.78 ± 0.08 ^b
MPD-3.6	3 025 ± 45 ^e	2 552 ± 6 ^{ab}	4 282 ± 32 ^b	1 730 ± 29 ^c	5.56 ± 0.04 ^a	76.70 ± 0.10 ^a

注:同一列不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.4 微波功率密度对玉米籽粒中淀粉静态流变学的影响

淀粉凝胶的流变特性是影响食品品质的重要因素,玉米经自然干燥和微波干燥后,其淀粉凝胶的触变行为如图3所示,所有样品均形成了顺时针触变环,表明样品受到剪切作用导致结构破坏和新结构的形成,剪切应力随剪切速率的增加而增加说明了其剪切稀化行为。淀粉分子在受到外界剪切力作用下,其三维网络结构会受到一定破坏,当剪切速率降低时,一部分链结构会自发地恢复到原来的形态,另一部分长链结构在较短时间内无法恢复到原来形态,导致整个链结构不能恢复到平衡状态,因此会构成一个闭合的触变环^[17,28]。为了进一步研究剪切速率对玉米淀粉凝胶触变行为的影响,试验采用幂律方程对触变行为进行拟合分析,结果如表3所示,所有样品的流体指数 n 均小于1,表明凝胶体系均是典型的假塑性流体,随着微波功率密度的增加稠度系数 K 呈先上升后

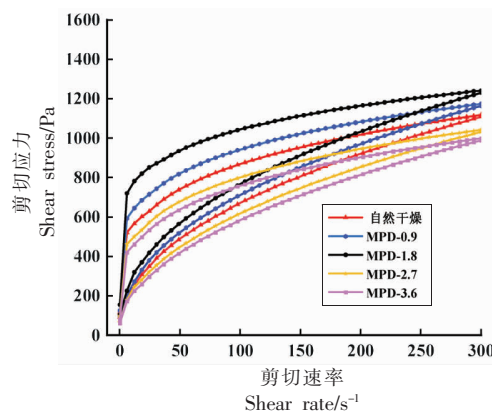


图3 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉凝胶的静态流变曲线

Fig.3 Static rheological curves of corn starch paste under natural drying and different microwave power densities

下降的趋势,流体指数 n 呈相反的趋势,表明微波功率密度在一定范围内(0.9~1.8 W/g),微波作用使淀粉分子间作用力增强,相互缠绕成紧密的网

络结构,产生了流动阻力,使 K 值增加, n 值降低,假塑性增强。据报道,支链淀粉分子的减少可能会增加淀粉凝胶的流动性,当微波功率密度达到 2.7 W/g 及以上时,过高的微波功率密度使玉米中支

链淀粉分子受到严重损伤,进而导致体系流动性增加^[29],使 K 值降低, n 值升高,假塑性减弱,结果与 Chen 等^[29]的研究相符。

表 3 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉凝胶静态流变曲线函数模型参数

Table 3 Model parameters of the static rheological curve function of corn starch paste under the conditions of natural drying and different microwave power densities

样品	上行线		R^2	下行线		R^2
	$K/\text{Pa}\cdot\text{S}^n$	n		$K/\text{Pa}\cdot\text{S}^n$	n	
自然干燥	306.65	0.23	0.995	81.83	0.46	0.999
MPD-0.9	372.21	0.20	0.991	90.85	0.45	0.999
MPD-1.8	487.97	0.16	0.976	106.31	0.43	0.999
MPD-2.7	267.15	0.24	0.997	72.71	0.46	0.999
MPD-3.6	240.86	0.25	0.997	65.19	0.48	0.999

2.5 微波功率密度对玉米籽粒中淀粉动态流变学的影响

淀粉凝胶受到外界作用力会发生形变,表现为弹性性质,作用力消失后,表现为黏性性质,淀粉凝胶的动态黏弹性主要与连续相中交联密度、分散相之间的有效接触、支链淀粉和直链淀粉之间的刚性及缠绕有关。储能模量(G')表示弹性行为,是储存在淀粉凝胶中的能量,损耗模量(G'')表示黏性行为,是整个循环期间黏性耗散变形引起的能量损失, $\tan \delta = G''/G'$,表示 G' 和 G'' 之间的关系,其中 $\tan \delta < 1$ 表示淀粉凝胶具有弹性优于黏性的性质^[30]。由图 4 可知,所有样品的 $\tan \delta$ 值均小

于 1,表明淀粉凝胶主要以弹性性质为主,随着角频率增加 $\tan \delta$ 呈先上升后下降的趋势,这表明淀粉凝胶在低频率扫描范围内流体性质强于固体性质,在高频率扫描范围内固体性质强于流体性质,结果与许秀颖等^[31]的研究一致。玉米经自然干燥和微波干燥后,其淀粉凝胶的 G' 和 G'' 值均随频率的增加而增加,显示出频率依赖性,表明它们均具有典型的凝胶状特征, G' 值均始终大于 G'' 值,也表明淀粉凝胶主要以弹性性质为主,其表现出典型的弱凝胶行为^[32]。

与自然干燥后的玉米相比,玉米经微波干燥后,其淀粉凝胶的 G' 和 G'' 发生明显变化,且随着

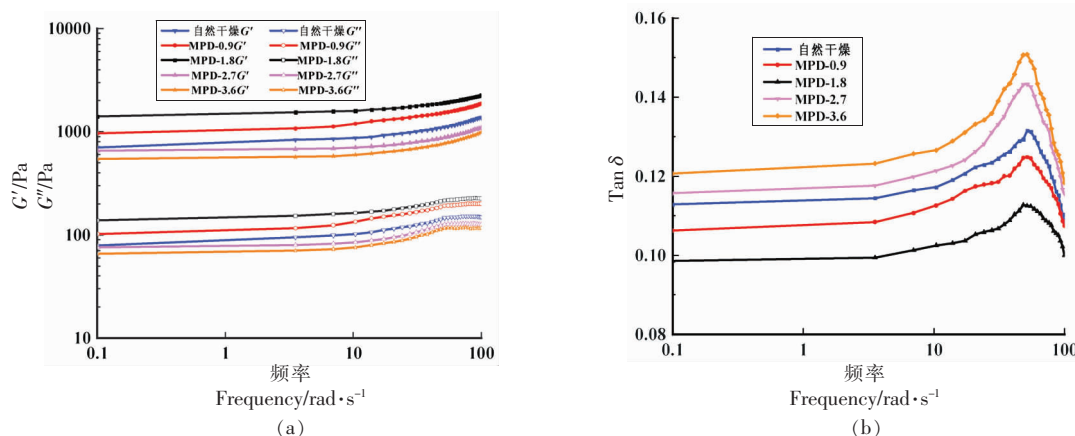


图 4 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉凝胶的 G' 、 G'' 和 $\tan \delta$ 曲线

Fig.4 G' , G'' and $\tan \delta$ curves of corn starch paste under the conditions of natural drying and different microwave power densities

微波功率密度的增加淀粉凝胶的 G' 和 G'' 值均呈先升高后降低的趋势,表明微波功率密度在一定范围内(0.9~1.8 W/g)微波作用可以通过增强淀粉分子链之间的相互作用增加凝胶的黏弹性,防止其在外力作用下变形。当微波功率密度达到 2.7 W/g 及以上时,玉米淀粉凝胶的 G' 和 G'' 值均降低,表明高强度微波作用降低了凝胶的黏弹性,这是由于淀粉凝胶的稳定性主要受长链淀粉分子的影响,高强度微波作用会导致淀粉中长链淀粉断裂及重排,使淀粉凝胶体系长链淀粉分子占比降低,进而使淀粉凝胶的黏弹性降低^[33]。与 RVA 糊化特性中峰值黏度的结果相符。通过流变学特性的结果发现,一定范围内的微波功率密度可以改善淀粉的黏弹性,将为加工黏弹性需求较高的产品提供参考和依据。

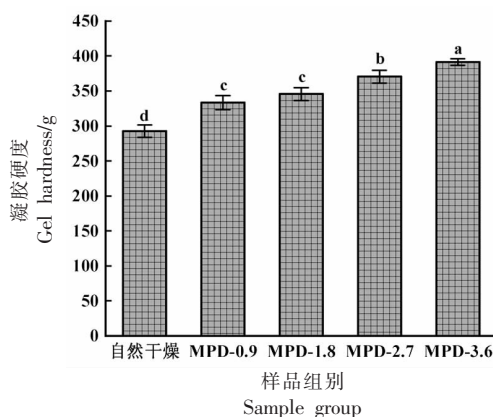
2.6 微波功率密度对玉米籽粒中淀粉凝胶硬度的影响

淀粉凝胶的硬度是评价淀粉类食品品质的重要指标之一,与直链淀粉和长链支链淀粉的含量有关^[34],一般情况下,硬度与淀粉类食品的品质呈负相关关系。如图 5 所示,与自然干燥的玉米相比,玉米经微波干燥后,其淀粉凝胶的硬度均显著增加($P<0.05$),且凝胶硬度随着微波功率密度的增加而增加,由 333.40 N 增加到 391.12 N,可能由于微波作用使玉米中部分长链支链淀粉发生断裂,从而使直链淀粉含量增加,由于直链淀粉含量越高,淀粉分子间相互交联的程度越大,导致淀粉凝胶的硬度增加^[31]。与 MPD-1.8 相比,当微波功率密度达到 2.7 W/g 时,凝胶硬度显著增加,这表明高强度微波作用对玉米中长链支链淀粉分子的破坏更严重。

2.7 微波功率密度对玉米籽粒中淀粉溶胀度的影响

溶解度和膨胀度是评价淀粉类食品品质的重要指标,与淀粉的相对分子质量、分子形状、支链淀粉的结晶性有关^[35]。如图 6 所示,与自然干燥的玉米相比,玉米经微波干燥后,其淀粉的溶解度和膨胀度发生明显变化。随着微波功率密度的升高,玉米淀粉的溶解度呈先升高后降低的趋势,在低微波功率密(0.9~1.8 W/g)条件下,淀粉颗粒结构被破坏,暴露亲水基团,从而增加淀粉颗粒的亲水

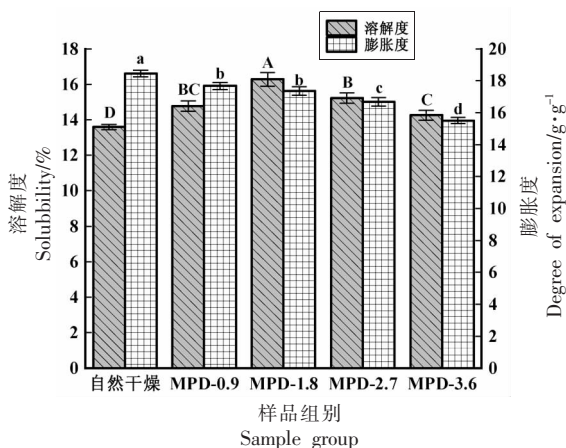
性,进而导致溶解度升高^[36]。与 MPD-1.8 相比,微波功率密度达到 2.7 W/g 及以上时溶解度降低,由于高强度微波作用使玉米中支链淀粉受到严重破坏,从而导致支链淀粉和直链淀粉的分子间相互作用减弱,进而导致溶解度降低^[37],结果与 Ma 等^[26]的研究相符;玉米淀粉的膨胀度随着微波功率密度的升高而降低,由于淀粉的膨胀度主要受支链淀粉的影响,直链淀粉则会抑制淀粉膨胀^[22],玉米在微波作用下支链淀粉会发生降解,导致双



注:不同字母表示样本间存在显著差异($P<0.05$)。

图 5 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉的凝胶硬度

Fig.5 Gel hardness of corn starch under natural drying and different microwave power densities



注:不同大写字母表示样本间存在显著差异;不同小写字母表示样本间存在显著差异($P<0.05$)。

图 6 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉溶胀度

Fig.6 Swelling degree of corn starch under natural drying and different microwave power densities

螺旋结构解离,淀粉链发生重新排列,进而导致膨胀度降低^[35],与 Wang 等^[38]采用微波处理甘薯淀粉得到的结果相符。

2.8 微波功率密度对玉米籽粒中淀粉粒径分布的影响

比表面积能够反映粉体粒径的大小,比表面积越大表明粉体粒径越小^[39],由表 4 可知,玉米经自然干燥后,其淀粉的体积平均径为 7.934 μm ,粒径小于 3.736 μm 的颗粒占总颗粒的 50%,玉米经

微波干燥后,其淀粉的中位径和体积平均粒径均增加,比表面积均减小,表明微波作用可以使玉米中淀粉的粒径增加,是由于微波作用使玉米的温度升高,使其内部压力增加,从而使淀粉颗粒膨胀,进而导致淀粉粒径增加^[40],随着微波功率密度的增加使淀粉颗粒的糊化程度增加,导致颗粒体积膨胀程度增加,进而导致淀粉颗粒的粒径增加,与 Chen 等^[41]的结果研究相符。

表 4 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉粒径分布

Table 4 Particle size distribution of corn starch under the conditions of natural drying and different microwave power densities

样品	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	$D_{(4,3)}/\mu\text{m}$	比表面积/ $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$
自然干燥	$0.999 \pm 0.002^{\text{d}}$	$3.736 \pm 0.033^{\text{c}}$	$21.717 \pm 0.142^{\text{c}}$	$7.934 \pm 0.077^{\text{c}}$	$758.100 \pm 1.493^{\text{a}}$
MPD-0.9	$1.006 \pm 0.002^{\text{c}}$	$3.936 \pm 0.041^{\text{b}}$	$22.740 \pm 0.072^{\text{d}}$	$8.361 \pm 0.100^{\text{d}}$	$744.600 \pm 2.066^{\text{b}}$
MPD-1.8	$1.010 \pm 0.002^{\text{bc}}$	$3.961 \pm 0.035^{\text{b}}$	$23.120 \pm 0.044^{\text{c}}$	$8.562 \pm 0.106^{\text{c}}$	$738.833 \pm 2.570^{\text{c}}$
MPD-2.7	$1.014 \pm 0.002^{\text{b}}$	$4.048 \pm 0.021^{\text{a}}$	$23.687 \pm 0.076^{\text{b}}$	$8.827 \pm 0.119^{\text{b}}$	$729.933 \pm 2.454^{\text{d}}$
MPD-3.6	$1.021 \pm 0.003^{\text{a}}$	$4.104 \pm 0.028^{\text{a}}$	$23.930 \pm 0.046^{\text{a}}$	$9.078 \pm 0.044^{\text{a}}$	$720.167 \pm 2.969^{\text{e}}$

注:同一列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别表示粒径小于该值的颗粒所占 10%、50%、90%、 $D_{(4,3)}$ 表示体积平均粒径。

2.9 微波功率密度对玉米籽粒中淀粉热特性的影响

淀粉的热特性是影响食品加工过程的重要性之一,与淀粉的相互作用、结晶度、颗粒大小和吸水能力有关。淀粉的热焓值表明解开双螺旋结构所需要的能量,热焓值的变化是由于颗粒的结晶区和非结晶区中氢键或双螺旋的破坏,可以反映淀粉分子链段有序性^[22,42]。如表 5 所示,玉米淀粉糊化过程中,所有样品在 54~82 $^{\circ}\text{C}$ 之间均出现一个窄而明显的吸热峰,起始温度 T_0 的变化范围为 54.36~59.55 $^{\circ}\text{C}$,峰值温度 T_p 的变化范围为 67.03~69.09 $^{\circ}\text{C}$,终止温度 T_e 的变化范围为 78.05~81.07 $^{\circ}\text{C}$,热焓值的变化范围为 8.77~12.06 J/g,与周静宜等^[18]研究结果相符。与自然干燥的玉米相比,玉米经微波干燥后,其淀粉的峰值温度升高,热焓值显著降低,且随着微波功率密度的增加玉米淀粉的峰值温度呈上升趋势,由 67.03 $^{\circ}\text{C}$ 上升到 69.09 $^{\circ}\text{C}$,与 RVA 中糊化温度上升相符,表明淀粉糊化延迟。玉米淀粉的热焓值随着微波功率密度的升高而降低,由于微波作用破坏了淀粉的结晶区,进而破坏双螺旋结构,使淀粉分子链趋于无序化^[43],当微波功率密度达到 2.7 W/g 及以上时,玉

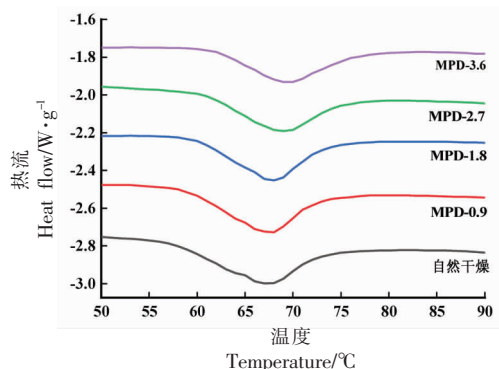


图 7 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉的热力学曲线

Fig.7 Thermodynamic curves of corn starch under the conditions of natural drying and different microwave power densities

米淀粉的热焓值降低更明显,表明高强度微波作用会严重破坏淀粉的结晶区。结果与 Wang 等^[40]的研究相符。

2.10 不同微波功率密度处理后玉米淀粉红外光谱(FT-IR)分析

玉米经自然干燥和微波干燥后,其淀粉的

表5 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉的热特性和有序度参数

Table 5 Thermal properties and order degree parameters of corn starch under natural drying and different microwave power densities

样品	起始温度(T_0)/ $^{\circ}\text{C}$	峰值温度(T_p)/ $^{\circ}\text{C}$	终止温度(T_c)/ $^{\circ}\text{C}$	$\Delta H/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	$R_{1047/1022}$
自然干燥	54.36 ± 0.20^e	67.03 ± 0.16^e	80.14 ± 0.09^e	12.06 ± 0.06^a	1.25 ± 0.02^a
MPD-0.9	54.82 ± 0.21^d	67.21 ± 0.20^e	78.05 ± 0.15^d	11.43 ± 0.11^b	1.22 ± 0.01^b
MPD-1.8	55.46 ± 0.23^e	68.52 ± 0.23^b	81.07 ± 0.15^a	10.73 ± 0.05^c	1.18 ± 0.01^c
MPD-2.7	57.55 ± 0.19^b	68.68 ± 0.17^b	78.45 ± 0.22^d	9.35 ± 0.10^d	1.13 ± 0.01^d
MPD-3.6	59.55 ± 0.19^a	69.09 ± 0.24^a	80.45 ± 0.17^b	8.77 ± 0.10^e	1.09 ± 0.02^e

注:同一列不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

FTIR 光谱如图 8 所示,在 3400 cm^{-1} 附近的宽峰是淀粉分子间氢键 O-H 的伸缩振动带, 2930 cm^{-1} 附近的峰是 C-H 的伸缩振动特征峰, 1600 cm^{-1} 附近的峰与 $-\text{CH}_2$ 的振动有关^[44]。所有 FTIR 光谱峰形均没有显著差异,均没有出现新的峰值,表明玉米经过微波干燥后,其淀粉没有产生新基团或化学键,未发生化学变化,与张吉军等^[27]的研究结果一致。玉米经微波干燥后,其淀粉吸收峰的强度发生变化,表明对应的化学键引起的振动强度发生变化,这是由于玉米吸收微波能,分子振动的强度变大。FTIR 光谱还可以观察到淀粉的短程有序结构,特别是双螺旋结构的变化,透光率在 1047 cm^{-1} 和 1022 cm^{-1} 处反映淀粉的结晶区和无定形区的结构特征,比值 $R_{1047/1022}$ 用于描述淀粉颗粒的短程分子序^[45]。如表 5 所示,随着微波功率密度的增加 $R_{1047/1022}$ 显著降低($P < 0.05$),从 1.25 降低到 1.09,是由于微波作用破坏了淀粉结晶区中

的双螺旋结构,进而导致淀粉分子的有序程度降低,与淀粉热特性的结果相符。

3 结论

本试验研究发现,与自然干燥的玉米相比,玉米经微波干燥后,其淀粉的理化性质发生明显变化。微波功率密度在 $0.9\sim 1.8\text{ W/g}$ 范围内,玉米淀粉的峰值黏度、溶解度显著增加,淀粉凝胶的黏弹性得到改善,淀粉的膨胀度有所降低,这些性质会直接或间接影响到淀粉类食品的加工品质。微波功率密度高于 1.8 W/g 时,玉米淀粉的峰值黏度、膨胀度显著降低,淀粉凝胶的硬度显著增加,这会严重影响到淀粉类食品的感官特性。玉米经微波干燥后,其含有的淀粉虽未发生化学变化,但热焓值和有序度降低,粒径增加。研究表明选择微波功率密度为 1.8 W/g 、微波作用时间为 2 min 、缓苏时间为 4 min 作为玉米微波间歇干燥条件即可保证干燥速率也可保证其加工品质。本研究结果将为玉米微波干燥产业化应用及玉米深加工提供理论和数据支持。

参考文献

- [1] ESPINOSA C D, FANELLI N S, STEIN H H. Digestibility of amino acids and concentration of metabolizable energy are greater in high-oil corn than in conventional corn when fed to growing pigs[J]. Animal Feed Science and Technology, 2021, 280: 115040.
- [2] ZHANG R Y, MA S, LI L, et al. Comprehensive utilization of corn starch processing by-products: A review[J]. Grain & Amp; Oil Science and Technology,

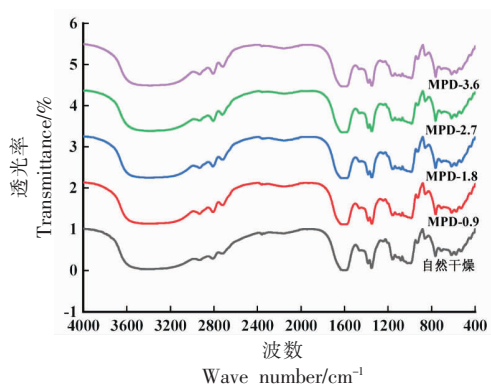


图8 自然干燥和不同微波功率密度作用条件下玉米淀粉的红外光谱图

Fig.8 Infrared spectra of corn starch under the conditions of natural drying and different microwave power densities

- 2021, 4(3): 89-107.
- [3] ISLAM M S, LIU J A, JIANG L, et al. Folate content in fresh corn; Effects of harvest time, storage and cooking methods[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2021, 103: 104123.
- [4] FATEMI A, SINGH V, KAMRUZZAMAN M. Identification of informative spectral ranges for predicting major chemical constituents in corn using NIR spectroscopy[J]. *Food Chemistry*, 2022, 383: 132442.
- [5] MIRSAM H, KALQUTNY S H, SURIANI, et al. Indigenous fungi from corn as a potential plant growth promoter and its role in *Fusarium verticillioides* suppression on corn[J]. *Heliyon*, 2021, 7(9): e07926.
- [6] MARQUES DA SILVA J R, SILVAL L. Relationship between distance to flow accumulation lines and spatial variability of irrigated maize grain yield and moisture content at harvest[J]. *Biosystems Engineering*, 2006, 94(4): 525-533.
- [7] XIE Y C, ZHANG Y, XIE Y K, et al. Radio frequency treatment accelerates drying rates and improves vigor of corn seeds [J]. *Food Chemistry*, 2020, 319: 126597.
- [8] 金旭, 王晨, 毕清跃, 等. 玉米热风干燥特性模拟研究[J]. *热科学与技术*, 2021, 20(2): 128-133.
- JIN X, WANG C, BI Q Y, et al. Simulation study on hot air drying characteristics of corn [J]. *Thermal Science and Technology*, 2021, 20(2): 128-133.
- [9] SZADZIŃSKA J, MIERZWA D. The influence of hybrid drying (microwave-convective) on drying kinetics and quality of white mushrooms[J]. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 2021, 167: 108532.
- [10] SHEN L Y, GAO M, ZHU Y, et al. Microwave drying of germinated brown rice; Correlation of drying characteristics with the final quality[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 70: 102673.
- [11] MACEDO L L, CORRÊA J L G, PETRI J I, et al. Intermittent microwave drying and heated air drying of fresh and isomaltulose (palatinose) impregnated strawberry[J]. *LWT*, 2022, 155: 112918.
- [12] AMNA C, NAHED F, MOHAMED A B, et al. Microwave drying effects on drying kinetics, bioactive compounds and antioxidant activity of green peas (*Pisum sativum* L.)[J]. *Food Bioscience*, 2018, 25: 32-38.
- [13] 韦珍珍, 段振华, 唐小闲, 等. 微波干燥工艺对月柿果片色泽质构及感官品质的影响[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(3): 168-175.
- WEI Z Z, DUAN Z H, TANG X X, et al. Effects of microwave drying process on color, texture and sensory quality of persimmon fruit slices[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2022, 38(3): 168-175.
- [14] 张紫恒, 张吉军, 唐正, 等. 北方梗高粱微波干燥特性试验与仿真分析[J]. *中国农机化学报*, 2021, 42(11): 65-71.
- ZHANG Z H, ZHANG J J, TANG Z, et al. Microwave drying characteristics test and simulation analysis of northern japonica sorghum[J]. *Chinese Journal of Agricultural Machinery Chemistry*, 2021, 42(11): 65-71.
- [15] 曹勇, 许秀颖, 赵城彬, 等. 新采收玉米籽粒中水分状态对淀粉热特性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(12): 79-84.
- CAO Y, XU X Y, ZHAO C B, et al. Effects of water status on thermal properties of starch in newly harvested maize kernels[J]. *Food Science*, 2018, 39(12): 79-84.
- [16] PETCHARAT J, SOMKIAT P, SAKAMON D, et al. Effects of fluidized bed drying temperature and tempering time on quality of waxy rice[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 95(3): 517-524.
- [17] 张晶, 张美莉. 超高压处理对燕麦淀粉颗粒特性、热特性及流变学特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 114-121.
- ZHANG J, ZHANG M L. Effects of ultra-high pressure treatment on granule properties, thermal properties and rheological properties of oat starch[J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 114-121.
- [18] 周静宜, 赵一霖, 张浩, 等. 热风干燥温度对糯玉米理化特性的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(13): 83-88.
- ZHOU J Y, ZHAO Y L, ZHANG H, et al. Effects of hot air drying temperature on physicochemical properties of waxy corn[J]. *Food Science*, 2020, 41(13): 83-88.
- [19] KO A, TA A, BI O. Hydrothermal treatments of finger millet (*Eleusine coracana*) starch[J]. *Food Hydrocolloids*, 2005, 19(6): 974-983.

- [20] 薛艾莲, 夏晓霞, 寇福兵, 等. 不同干燥方式联合熟化处理对板栗粉品质特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(9): 62-70.
XUE A L, XIA X X, KOU F B, et al. Effects of different drying methods combined with ripening treatment on the quality characteristics and microstructure of chestnut powder[J]. Food Science, 2022, 43(9): 62-70.
- [21] LUTFI Z, KALIM Q, SHAHID A, et al. Water chestnut, rice, corn starches and sodium alginate. A comparative study on the physicochemical, thermal and morphological characteristics of starches after dry heating[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 184: 476-482.
- [22] SU C Y, SALEH A S M, ZHANG B, et al. Effects of germination followed by hot air and infrared drying on properties of naked barley flour and starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 2060-2070.
- [23] HASSAN A B, ELKE P, DIETER V. Effect of microwave heating on the physicochemical characteristics, colour and pasting properties of corn (*Zea mays* L.) grain[J]. LWT, 2021, 138: 110703.
- [24] 田新惠, 唐玉明, 任道群, 等. 南北方酿酒高粱淀粉理化特性比较[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(1): 91-95.
TIAN X H, TANG Y M, REN D Q, et al. Comparison of physicochemical properties of sorghum starch in north and south[J]. Food and Fermentation Industry, 2017, 43(1): 91-95.
- [25] 郑玉玉, 杨晔, 尹登科, 等. 微波对玉米淀粉结构及理化性质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 99-104.
ZHENG Y Y, YANG Y, YIN D K, et al. Effect of microwave on the structure and physicochemical properties of corn starch[J]. Food Science, 2022, 43(11): 99-104.
- [26] MA M T, ZHANG Y, CHEN X J, et al. Microwave irradiation differentially affect the physicochemical properties of waxy and non-waxy hull-less barley starch[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 95: 103072.
- [27] 张吉军, 曹龙奎, 衣淑娟, 等. 微波间歇干燥对北方粳高粱蛋白质及淀粉品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(7): 52-60.
ZHANG J J, CAO L K, YI S J, et al. Effects of microwave intermittent drying on protein and starch quality of northern japonica sorghum [J]. Food Science, 2022, 43(7): 52-60.
- [28] WANG N, WU L R, ZHANG F S, et al. Modifying the rheological properties, *in vitro* digestion, and structure of rice starch by extrusion assisted addition with bamboo shoot dietary fiber[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131900.
- [29] CHEN X J, LIU Y, XU Z K, et al. Microwave irradiation alters the rheological properties and molecular structure of hull-less barley starch[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106821.
- [30] ZHANG K X, ZHANG Z H, ZHAO M, et al. Low-pressure plasma modification of the rheological properties of tapioca starch[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 125: 107380.
- [31] 许秀颖, 吴天昊, 崔维建, 等. 黑豆蛋白对不同直/支比玉米淀粉凝胶及其结构的影响[J]. 中国食品学报, 2021, 21(12): 55-64.
XU X Y, WU T H, CUI W J, et al. Effects of black bean protein on corn starch gels with different amylose / amylopectin ratios and their structures[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(12): 55-64.
- [32] JI X Y, LUO Y, SHEN M Y, et al. Effects of carboxymethyl chitosan on physicochemical, rheological properties and *in vitro* digestibility of yam starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 192: 537-545.
- [33] 王健一, 汤俊杰, 江祥富, 等. 微波法制备莲子淀粉-绿原酸复合物及其流变特性分析[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 129-136.
WANG J Y, TANG J J, JIANG X F, et al. Preparation of lotus seed starch-chlorogenic acid complex by microwave method and analysis of its rheological properties[J]. Food Science, 2021, 42(23): 129-136.
- [34] ZHANG X, CHEN D, ZHAO Z, et al. Rheological and textural properties of emulsion-filled gel based on enzymatically hydrolyzed rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 126: 107463.
- [35] 李世杰, 段春月, 刘畅. 微波对板栗淀粉结构和理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 31-35, 49.
LI S J, DUAN C Y, LIU C. Effects of microwave on the structure and physicochemical properties of

- chestnut starch[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2020, 35(2): 31–35, 49.
- [36] ZAILANI M A, KAMILAH H, HUSAINI A, et al. Functional and digestibility properties of sago (*Metroxylon sagu*) starch modified by microwave heat treatment[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 122: 107042.
- [37] BARUA S, RAKSHIT M, SRIVASTAV P P. Optimization and digestogram modeling of hydrothermally modified elephant foot yam (*Amorphophallus paeoniifolius*) starch using hot air oven, autoclave, and microwave treatments[J]. LWT, 2021, 145: 111283.
- [38] WANG W, ZHENG J, LI J, et al. Comparison of physicochemical properties and digestibility of sweet potato starch after two modifications of microwave alone and microwave-assisted L-malic acid[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 210: 614–621.
- [39] 李明娟, 张雅媛, 游向荣, 等. 不同干燥技术对核桃粕蛋白粉品质特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(5): 92–98.
- LI M J, ZHANG Y Y, YOU X R, et al. Effects of different drying techniques on the quality characteristics and microstructure of walnut meal protein powder[J]. Food Science, 2021, 42(5): 92–98.
- [40] WANG L Y, WANG M, ZHOU Y H, et al. Influence of ultrasound and microwave treatments on the structural and thermal properties of normal maize starch and potato starch: A comparative study[J]. Food Chemistry, 2022, 377: 131990.
- [41] CHEN X J, MA M T, LIU X X, et al. Microwave treatment alters the fine molecular structure of waxy hull-less barley starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193: 1086–1092.
- [42] 尹慧敏, 吴文福, 窦建鹏, 等. 热风干燥条件对马铃薯全粉糊化品质的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(12): 293–300.
- YIN H M, WU W F, DOU J P, et al. Effect of hot air drying conditions on the gelatinization quality of potato whole flour[J]. Chinese Journal of Agricultural Engineering, 2017, 33(12): 293–300.
- [43] LI Y, HU A J, ZHENG J, et al. Comparative studies on structure and physicochemical changes of millet starch under microwave and ultrasound at the same power[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 141: 76–84.
- [44] LIANG R, LIANG Q Y, LI Z B, et al. Assessment of the thermal hazards and oxidization mechanism of coloured corn starch dust by TG-FTIR[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 69: 104380.
- [45] HAN Z, LI Y, LUO D H, et al. Structural variations of rice starch affected by constant power microwave treatment[J]. Food Chemistry, 2021, 359: 129887.

Effects of Microwave Intermittent Drying on Physicochemical Properties of Starch in Corn Kernels

Wang Xinzhi, Wang Tianchi, Wu Yuzhu*, Liu Jingsheng, Xu Xiuying, Zhao Chengbin

(College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, National Engineering Research Center for Deep Processing of Wheat and Corn, Changchun 130118)

Abstract In order to improve the drying rate of corn and clarify the effect of microwave intermittent drying on the starch in corn, this paper took ‘Jinongyu 719’ as the research object, and compared the effects of natural drying and microwave intermittent drying on the processing and structural properties of corn starch under different microwave power densities. The results showed that compared with natural dried corn, the properties of corn starch changed significantly after microwave drying. When the microwave power density was in the range of 0.9–3.6 W/g, the peak viscosity and solubility of corn starch increased first and then decreased. When the microwave power density was 1.8 W/g, the peak viscosity and solubility of starch were the highest. The results of static rheology showed that the starch gel of corn was pseudoplastic fluid after natural drying and microwave drying. The results of dynamic rheology showed that when the microwave power was in the range of 0.9–1.8 W/g, the viscoelasticity of corn starch gel could be significantly improved by

microwave. When the microwave power density was 1.8 W/g, the viscoelasticity of starch gel was the best. When the microwave power density was higher than 1.8 W/g, the hardness of corn starch gel increased significantly. After microwave drying, the swelling degree, enthalpy value and order degree of corn starch decreased, and the particle size increased. The results showed that the characteristics of corn starch dried with microwave power density of 1.8 W/g, microwave action time of 2 min and soaking time of 4 min were the best.

Keywords microwave; intermittent drying; corn; starch; processing properties; structural properties