

微波辐射对小麦胚芽糊化特性与微观结构的影响*

徐 斌 周世龙 苗文娟 董 英
(江苏大学食品与生物工程学院, 镇江 212013)

【摘要】 为研究微波辐射对小麦胚芽(WG)品质的影响,采用连续式微波装备对 WG 进行稳定化处理,并用扫描电镜、粘度仪分析了微波辐射对其微观结构、淀粉糊化等特性的影响。结果表明,微波对 WG 有很好的稳定化效果,在有效钝酶的前提下经微波处理的 WG 仍可观察到完整的淀粉颗粒,并伴有清晰的轮廓,但随着微波辐射强度的提高,其中油脂、蛋白质及淀粉之间原有的空间结构发生了一定的改变。微波处理后 WG 的糊化温度由原来的 58.5℃ 升至 59.3 ~ 65.4℃,根据初始糊化程度的不同,出现具有一定意义的峰值粘度(349 ~ 466 BU)和破损值(69 ~ 87 BU)。微波处理后的 WG 中脂肪酸组成和 α-维生素 E 含量无明显改变。研究表明,微波辐射在有效钝酶的同时,对 WG 的品质也产生了部分影响。但与传统热处理方法相比,微波辐射对 WG 品质影响程度较小,微波稳定化具有很好的工业化应用前景。

关键词: 小麦胚芽 微波 扫描电镜 微观结构 糊化特性
中图分类号: TS201.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)12-0151-07

Microstructure and Pasting Characteristics of Wheat Germ
Treated by Microwave Radiation

Xu Bin Zhou Shilong Miao Wenjuan Dong Ying
(School of Food and Biological Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

In order to study the impact of microwave radiation on wheat germ (WG) quality, a continuous microwave radiation system was constructed. Scanning electron microscopy and micro-viscometer were used to detect the influence of microwave radiation on microstructure and starch pasting characteristics of WG. The results showed that the continuous microwave radiation system had a good stabilization effect on WG. The majority starch granules in microwave-treated WG were still intact observed by SEM, accompanied by a clear outline. However, with the microwave radiation intensity increased, the original spatial structure changed among starch granule, oil and protein. The gelatinization temperature of microwave treated WG rose to a range of 59.3 ~ 65.4℃. Depending on their extent of pre-gelatinization, different WG samples gave significantly different peak viscosity (349 ~ 466 BU) and break down values (69 ~ 87 BU). Compared with that of raw WG samples, the fatty acids composition and tocopherol content of WG treated by microwave did not change significantly. The above results showed that microwave radiation did have some effect on WG quality, but less than traditional heating methods. Microwave stabilization should have a good prospect for industrial application.

Key words Wheat germ, Microwave, Scanning electron microscopy, Microstructure, Pasting characteristics

收稿日期: 2011-12-12 修回日期: 2012-05-29
* 中国博士后科学基金资助项目(2012M521020)、江苏省高校优势学科建设工程资助项目和江苏大学高级人才基金资助项目(12JDG055)
作者简介: 徐斌,副教授,主要从事粮油深加工技术研究,E-mail: xubin@ujs.edu.cn
通讯作者: 董英,教授,博士生导师,主要从事食品生物技术研究,E-mail: ydong@ujs.edu.cn

引言

小麦胚芽(WG)含有极其丰富且优质的蛋白质、脂肪、维生素及矿物质^[1],基于WG的高营养价值与可口的风味,可对WG进行深加工从而开发麦胚食品或食品强化剂。但由于不饱和脂肪酸、微生物以及脂肪酶(LA)、脂肪氧化酶(LOX)和多酚氧化酶等多种内源酶的存在,WG贮藏稳定性较差。国内外已有多篇论文涉及WG稳定化方法的研究,包括蒸气加热、微波加热、多层多室流化床、喷动床加热、加入抗氧化剂以及采用三层聚乙烯袋包装等,少部分还申请了专利^[2~9]。

已有试验证明,微波钝酶效果优于传统加热方式^[10]。然而,以往微波稳定化试验,主要针对微波钝酶效率以及WG的储藏稳定性,由此来证明微波稳定化效果优于传统加热方式,而未深入探讨微波对WG品质的影响^[11~12]。同时微波钝酶试验装置主要是采用家用微波炉,其分批、间断式处理所得数据与用于工业化生产过程中的微波连续式处理有着明显的差异^[13]。

本研究运用连续式微波装置对WG进行在线稳定化处理,采用微型糊化粘度仪、扫描电镜(SEM)以及GC等仪器,研究不同条件微波处理后WG的微观结构、淀粉糊化特性和脂肪酸组成等的变化,揭示微波辐射对WG品质可能造成的影响。

1 材料与仪器

1.1 材料与试剂

WG,山东永乐食品有限公司,-20℃冰箱贮藏,备用。

三乙酸甘油酯、牛血清白蛋白、α-维生素E、亚油酸,Sigma公司;初级压榨橄榄油,品利(上海)食品有限公司;其他试剂为分析纯,国药上海化学试剂公司。

1.2 仪器与设备

1.2.1 试验仪器

JSM-7001F型热场发射扫描电镜,日本JEOL电子株式会社;803201微型粘度仪,德国Brabender公司;5890型气相色谱仪,美国Agilent公司;Kjeltec8400型全自动凯氏定氮仪,瑞典FOSS公司;HB43-S型卤素水分快速测定仪,梅特勒-托利多公司;LC-20A型液相色谱仪,日本岛津公司。

1.2.2 试验装置

连续微波稳定化设备由控制系统、微波发生系统、传动系统、物料输送系统、温控系统和空气调节系统等6部分组成(图1)^[14]。微波频率(2450±

50) MHz;微波功率0~6 kW,连续可调。滚筒传动为电磁无级调速。采用97FLJ2WYD4-2F型工频离心风机作为除湿风机,最大风量80 m³/h。设备处理能力为15~50 kg/h。

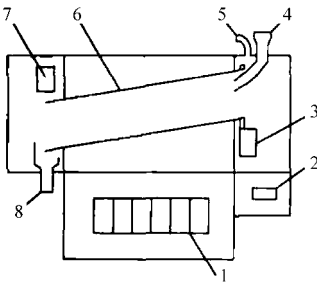


图1 连续式微波装置示意图

Fig.1 Sketch map of continuous-flow microwave equipment

- 1.微波加热管 2.控制器 3.传动装置 4.进料口 5.排风口
6.滚筒 7.远红外测温装置 8.出料口

2 试验方法

2.1 WG连续微波稳定化处理

控制进料量20 kg/h,并按表1条件设置试验参数,进行WG的微波稳定化处理。微波装置开始工作时,首先开启传动装置和进料控制按钮,待WG进入滚筒后开启微波发生器。通过调节滚筒转速或倾角、微波发生器的功率调节按钮以及除湿风机的风门来改变设备的工作参数,每次改变参数待其运行平稳、温度指示稳定后再采集样品。所有处理过的样品用聚乙烯袋封装,冷却到室温。再用保鲜袋按照250 g/袋进行分装,-5℃冰箱储存、备用。

表1 WG的微波稳定化处理条件

Tab.1 Stabilization conditions of WG by microwave treatment

样品 编号	微波作用 功率/kW	微波作用 时间/min	通风量 /m ³ ·h ⁻¹	温度 /℃
对照				
1	2	2	60	56
2	2	5	40	67
3	2	8	20	66
4	3	2	40	65
5	3	5	20	68
6	3	8	60	68
7	4	2	20	71
8	4	5	60	69
9	4	8	40	75

2.2 酶活力分析

2.2.1 LA活力测定

参考Devin方法,并作改进^[15]。取待测WG样

品,粉碎(30 目)。分别称取 2 g WG(干基,精确至 0.001 g)装入两支离心管中。样品管(Af)加 1.5 mL 橄榄油并与 WG 充分混合。45℃ 培养箱中反应 24 h,用 30 mL 正己烷、分 3 次萃取反应物。萃取液减压浓缩,残渣复溶于 4 mL 异辛烷。24 h 后空白对照管(Ai)加同样量的橄榄油,均质,与上述同法萃取反应物。最后向两份异辛烷溶液中分别加入 2 mL 质量浓度为 5 mg/mL 的醋酸铜(用吡啶调至 pH 值 6.1),振荡,离心取上层有机相,在波长 715 nm 下测定吸光度,由下式计算得 LA 活力

$$L_A = 1\,000 \frac{(4 + V)(A_f - A_i)}{\epsilon t l s}$$

式中 L_A ——LA 活力,U/g
 V ——加入橄榄油的体积,mL
 A_f ——培养样品在波长 715 nm 处的吸光度
 A_i ——空白样品在波长 715 nm 处的吸光度
 ϵ ——油酸在波长 715 nm 处的摩尔吸光系数,(mmol/L)⁻¹·cm⁻¹
 t ——反应时间,h l ——比色皿厚度,cm
 s ——样品干质量,g

2.3.2 LOX 活力测定

称取 10.0 g 粉碎的 WG,加入 100 mL 浓度为 0.1 mol/L 醋酸(盐)缓冲液(pH 值 4.5),4℃ 搅拌 30 min,悬浮液 4℃、8 000 r/min 离心 15 min,获得 LOX 粗酶液^[16]。以亚油酸-无水乙醇溶液为底物(亚油酸浓度和吐温-20 的质量浓度分别为 2.53 × 10⁻³ mol/L、0.8 mg/mL),反应体系组成为 2.0 mL 缓冲溶液,200 μL 底物溶液,50 μL 粗酶液,在波长 234 nm 处测定反应体系吸光值的变化^[17]。一个 LOX 酶活力单位定义为反应液每分钟每毫克蛋白在波长 234 nm 处的紫外吸光值变化 0.01 单位。

2.3 脂肪酸组成分析

参考 AOAC 996.01 标准,面积归一法计算脂肪酸含量。

GC 色谱条件:色谱柱为 HP-INNOWax 19091-133 (30 m × 0.25 mm; 0.25 μm 薄膜)毛细管柱;FID 检测器;进样口 250℃;检测器 260℃;分流比:40:1;载气 N₂ 流速 100 mL/min;氢气流速 40 mL/min;空气流速 350 mL/min;程序升温:起始温度 180℃(保持 4 min);升温,3℃/min;终点温度 240℃,保持 15 min。

2.4 扫描电镜分析

微波处理前、后的 WG 片,使用导电双面胶固定在 SEM 铜样品台上,用洗耳球吹去未固定的样品。真空离子溅射喷金镀膜,用 JSM-7001F 型热场发

射电镜扫描,加速电压为 15 kV,放大倍数分别为 500 和 2 000。

2.5 糊化特性分析

不同微波条件处理前、后的 WG 经锤式粉碎机磨碎,样品糊化特性用微型粘度仪测量。每份样品 30 g,水分含量为 14%(根据 WG 的实际含水量而定),加入 100 mL 蒸馏水(修正到 14%,湿基)置于微型粘度仪样品钵中。

样品糊化特性测量的初始平衡温度为 30℃,以 7.5℃/min 加热到最高温度 95℃,保温 5 min,然后以 7.5℃/min 降温至 50℃,保持 5 min。搅拌速率为 250 r/min,测定范围为 700 cmg。糊化温度、峰值粘度、破损值等测定参数由淀粉糊化曲线谱图得出。

2.6 α-维生素 E 的含量测定

参考 AOAC 2001.13 标准规定的方法。
HPLC 色谱条件:色谱柱 Zorbax RX-SIL (5 μm,4.6 mm × 250 mm);检测器 UV 波长 292 nm;流动相为正己烷与异丙醇体积比 98.5:1.5;柱温 27℃;流速 1.1 mL/min;进样量 10 μL。

2.7 统计分析

采用 SPSS 17.0 进行数据分析,用 95% 置信水平($P < 0.05$)来说明数据间差异显著性。每组试验重复 3 次,试验结果为 3 次测定结果的平均值。

3 结果与讨论

3.1 酶活力

在本试验设定的条件下,微波辐射并不能使 LA 变性失活,仅是降低了 WG 的水分活度,从而有效抑制了 LA 的催化活性(表 2),与蒸气钝酶相比,钝化效果较差。这主要是因为一个是干热处理,在低水分体系下,WG 中的 LA 具有很好的热稳定性;另一个是湿热处理,在湿热条件下酶蛋白较易变性失活,但湿热处理需要二次干燥处理。不同微波条件处理得到的 WG,除 1 号样品(微波处理温度 56℃)与 4 号样品(微波处理温度 65℃)分别有 15%、60% 的 LOX 失活,其他样品(微波处理温度 66℃ 以上)LOX 均被完全失活(表 2)。由此说明,LOX 对热敏感,66℃ 以上的微波处理可以使 LOX 完全失活。Rao 等^[2]和 Vetrimani 等^[10] 早先报道他们用不同的热处理可以完全钝化 LOX。

3.2 脂肪酸组成

WG 脂肪酸组成分析结果表明,尽管各组 WG 受到功率强弱不等的微波处理,且微波辐射时间也不同,但所有经微波稳定化处理的 WG,与对照组相比具有相同的主要脂肪酸种类,且主要脂肪酸含量也没有产生变化($P > 0.05$)(表 3),较小的极差值

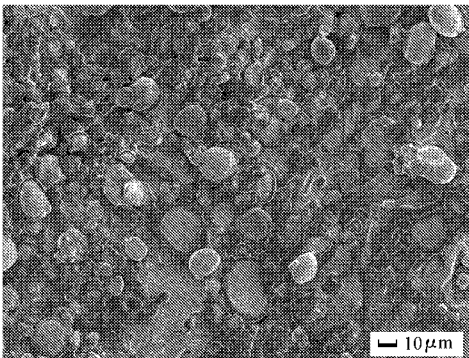
也表明了这一点。由此说明,适当强度的微波辐射对 WG 脂肪酸组成和相对含量未产生影响。

表 2 不同微波处理条件对 WG 酶活力的影响

Tab.2 Effect of different microwave-treated conditions on enzyme activity of WG				
样品 编号	LA 活力 /U·g ⁻¹	LA 相对 酶活/%	LOX 活力 /U·mg ⁻¹	LOX 相对 酶活/%
对照	0.269 ± 0.011	100	0.503 ± 0.022	100
1	0.199 ± 0.005	73.83	0.42 ± 0.014	85.09
2	0.206 ± 0.005	76.51	0	0
3	0.132 ± 0.008	48.99	0	0
4	0.148 ± 0.011	55.03	0.20 ± 0.005	39.76
5	0.089 ± 0.009	32.89	0	0
6	0.047 ± 0.005	17.45	0	0
7	0.099 ± 0.010	36.91	0	0
8	0.043 ± 0.004	16.11	0	0
9	0.040 ± 0.002	14.77	0	0

表 3 不同条件微波处理后 WG 的脂肪酸组成

Tab.3 Fatty acids composition of WG treated by different microwave conditions					%
样品 来源	棕榈酸 C16:0	油酸 C18:1	亚油酸 C18:2	α-亚麻酸 C18:3	硬脂酸 C18:0
对照	16.27	13.80	60.64	7.24	0.54
1	16.45	13.91	60.45	7.15	0.54
2	16.37	13.87	60.18	7.08	0.60
3	16.38	13.81	60.10	7.12	0.58
4	16.63	13.84	59.90	7.22	0.59
5	16.24	13.92	60.59	7.20	0.54
6	16.45	13.92	60.47	7.16	0.46
7	16.25	13.86	60.46	7.11	0.54
8	16.18	13.88	60.54	7.10	0.53
9	16.48	13.70	60.59	7.11	0.55
极差	0.45	0.22	0.74	0.16	0.14



3.3 微观结构

图 2 为未处理的 WG 在不同放大倍数观察下的 SEM 图。其微观结构显示了完整的淀粉颗粒并伴随着清晰可见的轮廓,且分布均匀,不同大小的淀粉颗粒通过蛋白脂薄膜串在一起。经较弱微波处理的 1 号样品,SEM 图(图 3)显示大部分仍为完整无缺的淀粉颗粒,并伴有清晰的轮廓,淀粉颗粒似乎陷在蛋白质模型中较浅,表面光滑;但经较强微波处理的 9 号样品(图 4),淀粉颗粒似乎陷在蛋白质分子中较深,呈“熔融状”。分析为微波辐射使胚芽中水分从 WG 内部游离出,在一定温度下淀粉颗粒与蛋白质直接发生一定的交联,使淀粉颗粒、油脂及蛋白质之间原有的空间结构发生了改变。

蛋白质的变性程度以及淀粉的糊化程度主要是取决于样品的受热程度与其水分含量^[18]。Sudha 等^[13]研究了蒸气处理对 WG 微观结构的影响。经蒸气处理 WG 的 SEM 图显示,由于在处理过程中淀粉颗粒发生糊化,而发生伸长或者其他非球体变形,表面也不再光滑,糊化的淀粉颗粒被蛋白质包裹。而经不同微波条件处理的 WG,其淀粉糊化程度虽有所变化,但相对于蒸气热处理来说,微波辐射对 WG 中淀粉颗粒的破坏较弱,说明了微波辐射对 WG 中淀粉的糊化特性影响程度明显弱于蒸气处理稳定化方法。

图 5 对比分析了较强微波辐射的 9 号样品与对照样品经粉碎后的 SEM 图。微波处理前、后淀粉颗粒均完整无缺,并伴有清晰的轮廓,且形状相似,但体积有所增加。说明微波对 WG 中淀粉起到了一定的膨化作用。

3.4 糊化特性

图 6 可见,微波辐射不同程度地提高了 WG 的糊化温度。对照组 WG 的糊化温度为 58.5℃,而经

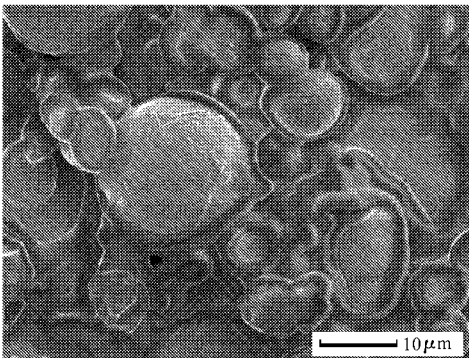


图 2 对照组 WG 的 SEM 图
Fig.2 Scanning electron micrographs of raw WG
(a) ×500 (b) ×2 000

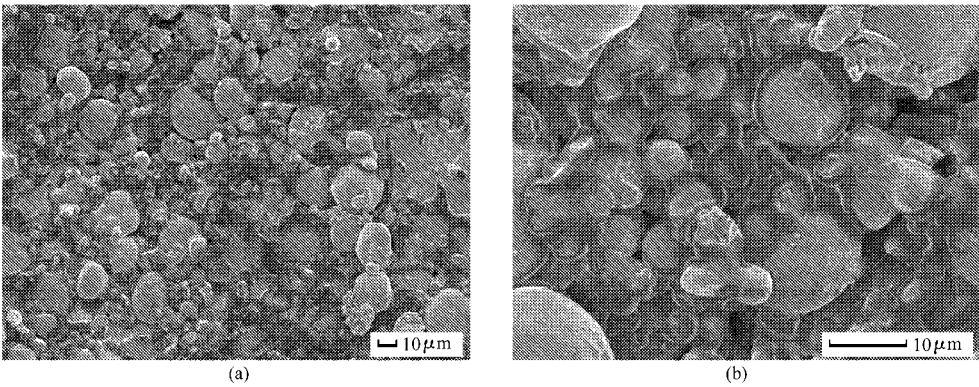


图 3 1 号样品 WG 的 SEM 图

Fig. 3 Scanning electron micrographs of WG sample one

(a) ×500 (b) ×2 000

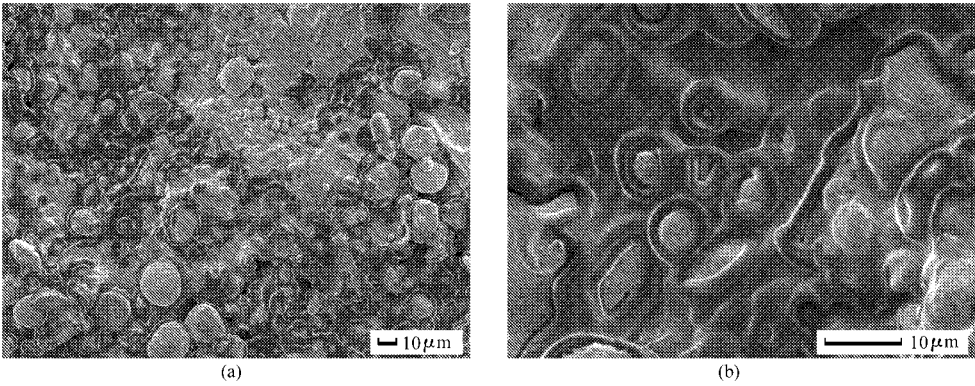


图 4 9 号样品 WG 的 SEM 图

Fig. 4 Scanning electron micrographs of WG sample nine

(a) ×500 (b) ×2 000

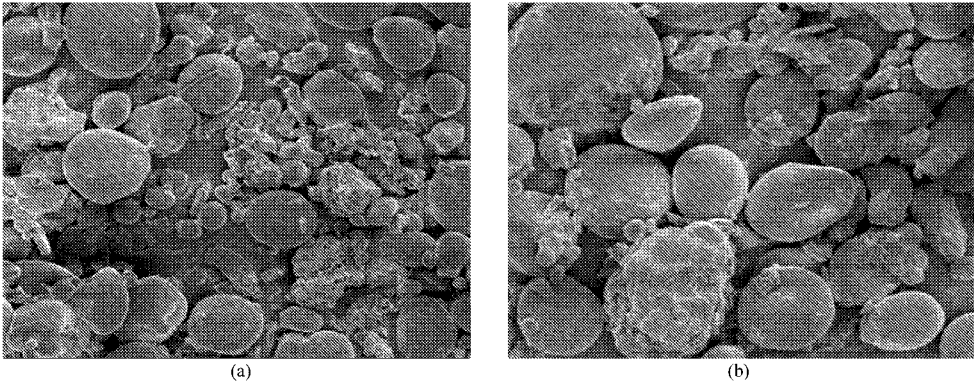


图 5 微波处理 WG 经粉碎后的 SEM 图

Fig. 5 Scanning electron micrographs of microwave-treated and crushed WG

(a) 对照样品, ×1 200 (b) 9 号样品, ×1 200

过不同条件微波处理后的 WG 样品除 1 号样品之外,其他样品糊化温度增加到 59.3 ~ 65.4℃。粘度是淀粉颗粒在物理特性变化前自由膨胀的能力,而最大粘度峰表示淀粉的最大膨胀能力^[19]。对照组 WG 的初始粘度为 58 BU,经高功率长时间微波处理样品的初始糊化粘度下降为 21 BU。Bhattacharya 等^[20]在热挤压产品中以初始的糊化粘度作为糊化程度强弱的指标,这表明较强的微波条件处理样品,使其在较高温度下造成一定程度的预糊化。对照组

WG 的糊化曲线在 88.9℃ 达到粘度峰,其他微波处理过的样品,在 87.9 ~ 90.5℃ 达到粘度峰。对照样品 WG 的最大粘度峰值为 490 BU,而不同条件微波处理的 WG 样品(1 号样品除外),根据其预糊化程度不同,出现相对较低的粘度峰值 349 ~ 466 BU。

较弱条件微波辐射后 1 号样品的糊化温度、粘度峰值反而高于对照 WG,这可能是因为温和的微波处理使 WG 结构蓬松(从 SEM 图可以看出),淀粉颗粒被分离在空隙中,在糊化过程中水分更容易进

入淀粉粒的非晶质部分,从而使淀粉颗粒更容易溶胀形成溶液状态,糊化粘度峰值升高。对照组 WG 和 1 号样品的淀粉破损值较高(154 和 202 BU),而 6、9 号样品的较低(69 ~ 87 BU)。这表明对照组和 1 号样品 WG,其淀粉颗粒变得更易糊化,也表示淀粉糊的粘度热稳定性较差;较强微波条件使 WG 淀粉颗粒部分发生预糊化,热稳定性有所提高,这与 SEM 分析结果相吻合,蛋白质粘附在淀粉颗粒表面,使其相对不容易破坏。

Sudha 等^[13]研究了不同热处理对 WG 糊化特性的影响。不同的加热方式处理的 WG,根据其预糊化程度不同,出现不同的峰值粘度(221 ~ 268 BU)和破损值(0 ~ 9 BU),可见蒸气处理较大改变了 WG 的糊化特性。相比而言,适度的微波辐射对 WG 的糊化特性的影响较弱,同时还有助于提高其中淀粉的热稳定性。

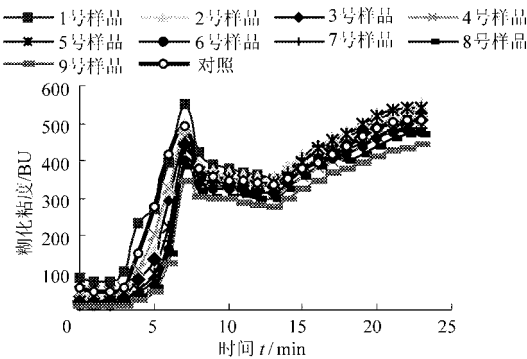


图 6 不同条件微波处理后 WG 的糊化特性曲线
Fig.6 Pasting characteristics curves of raw WG

3.5 α-维生素 E

从图 7 可以看出,尽管采用了不同的微波功率

与作用时间对进行稳定化处理,但所有经微波辐射的 WG 样品,与对照组相比,α-维生素 E 的含量没有产生明显变化($P > 0.05$)。

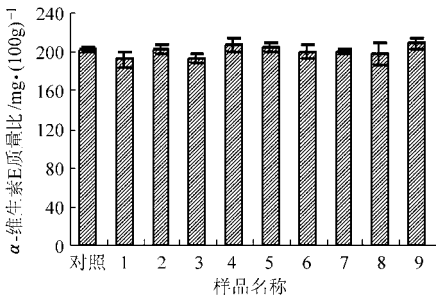


图 7 不同条件微波处理后 WG 的 α-维生素 E 含量
Fig.7 Tocopherol content of WG treated by different microwave conditions

4 结论

(1)在本试验设定的条件下,微波辐射并不能使 LA 变性失活;而 LOX 对热敏感,66℃ 以上的微波处理可以使其完全失活。

(2)SEM 分析结果表明,微波处理的 WG 与对照 WG 相比淀粉颗粒及其与其他组分之间空间结构差别不大,只是微波作用使 WG 发生一定的膨化。可见,微波辐射对 WG 微观结构影响较弱。

(3)微波辐射对 WG 的糊化特性未产生明显影响。与对照 WG 相比处理样品的糊化温度轻微的增加,而初始糊化粘度、粘度峰值、破损值有所降低,且随微波功率、作用时间的增加差异性增大。

(4)经微波稳定化处理的 WG,与对照相比,油脂的脂肪酸组成以及其中 α-维生素 E 含量未发生明显变化。

参 考 文 献

1 Shurpalekara S R, Rao H P. Wheat germ[J]. Advances in Food Research, 1977,23:187 ~ 304.

2 Rao H P, Kumar G V, Shurpaleker S R, et al. Studies on stabilization of wheat germ[J]. Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie,1980,13(6):302 ~ 307.

3 Srivastava A K, Sudha M L, Baskaran V, et al. Studies on heat stabilized wheat germ and its influence on rheological characteristics of dough[J]. European Food Research and Technology, 2007,224(3):365 ~ 372.

4 徐斌,董英,吴艳博,等.麦胚多层多室流化床在线稳定化试验[J].农业机械学报,2010,41(1):127 ~ 131.
Xu Bin, Dong Ying, Wu Yanbo, et al. Technology and equipment of stabilized storage of wheat germ by on-line multistage fluidization drying [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 40 (1): 127 ~ 131. (in Chinese)

5 Yöndem- Makascioglu F, Gurun B, Dik T, et al. Use of a spouted bed to improve the storage stability of wheat germ followed in paper and polyethylene packages[J]. Journal of Food and Agriculture,2005,85(8):1 329 ~ 1 336.

6 Baldini V L S, Iaderoza M, Draetta I. Chemical and bio-chemical characterization of wheat germ and maize germ [J]. Coletanea do Instituto de Tecnologia de Alimentos, 1982,12:1 ~ 14.

7 Prochazka M, Prihodoya J. Trends in bakery products manufacture[J]. Mlynsko-Pekarensky-Prumysl, 1975,21(8):234 ~ 236.

8 Galle K L. Process for producing milled stabilized wheat germ; United States, 3,783,164 [P]. 1974-01-01.

9 Huessy E G. Processing of wheat germ to retard rancidification; United States, 3,895,121 [P]. 1975-07-15.

- 10 Vetrimani R, Jyothirmayi N, Haridas R P, et al. Inactivation of lipase and lipoxxygenase in cereal bran, germ and soybean by microwave treatment[J]. *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie*, 1992,25(6):532 ~ 535.
 - 11 Kumar G V, Emilia V T, Haridas R P, et al. Effect of heat treatment on the nutritive value of wheat germ[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 1980,17(6):256 ~ 258.
 - 12 徐斌,董英,吴艳博. 小麦胚芽的微波在线稳定化试验[J]. *农业机械学报*, 2009,40(8):134 ~ 138.
Xu Bin, Dong Ying, Wu Yanbo. Study on technology of stabilized storage of wheat germ by on-line microwave processing [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009,40(8): 134 ~ 138. (in Chinese)
 - 13 Sudha M L, Srivastava A K, Leelavathi K. Studies on pasting and structural characteristics of thermally treated wheat germ [J]. *European Food Research and Technology*, 2007,225(3 ~ 4):351 ~ 357.
 - 14 董英,徐斌. 一种小麦胚芽在线灭酶的方法及装备:中国, 200710130943.6 [P]. 2007-09-03.
Dong Ying, Xu Bin. Technology and equipment of stabilized storage of wheat germ by on line microwave processing:China, 200710130943.6[P]. 2007-09-03. (in Chinese)
 - 15 Devin J R, Oscar A P. A simple method to measure lipase activity in wheat and wheat bran as an estimation of storage quality [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2006,83(5): 415 ~ 419.
 - 16 Shiiba K, Negishik Y, Okada S. Purification and characterisation of lipoxxygenase isozymes from wheat germ[J]. *Cereal Chemistry*, 1991, 6(8):115 ~ 122.
 - 17 Zimmerman D C, Vick B A. Hydroperoxide isomerase a new enzyme of lipid metabolism[J]. *Plant Physiology*, 1970, 46(3):445 ~ 453.
 - 18 Srivastava A K, Meyer D, Rao H. Scanning electron microscopic study of dough and chapati from gluten-reconstituted good and poor quality flour[J]. *Journal of Cereal Science*, 2002,35(2):119 ~ 128.
 - 19 Tipples K, D'Appolonia B, Dirks B, et al. Uses and applications[M]//Shuey C, Tipples K. *The Amylograph Handbook*. St. Paul: The American Association of Cereal Chemists, 1980:12 ~ 24.
 - 20 Bhattacharya S, Sudha M L, Rahim A. Pasting characteristics of an extruded blend of potato and wheat flours[J]. *Journal of Food Engineering*, 1999,40(1 ~ 2):107 ~ 111.
-

(上接第 175 页)

- 6 梁喜凤,王永维,苗香雯. 番茄收获机械手避障运动规划[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(11): 89 ~ 93.
Liang Xifeng, Wang Yongwei, Miao Xiangwen. Motion planning of a tomato harvesting manipulator for obstacle avoidance [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(11): 89 ~ 93. (in Chinese)
- 7 姚立健,丁为民,陈玉仑,等. 茄子收获机器人机械臂避障路径规划[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(11): 94 ~ 98.
Yao Lijian, Ding Weimin, Chen Yulun, et al. Obstacle avoidance path planning of eggplant harvesting robot manipulator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(11): 94 ~ 98. (in Chinese)
- 8 李东洁,邱江艳,尤波,等. 机械臂三维避障算法研究[J]. *控制工程*, 2010, 17(5): 669 ~ 673.
Li Dongjie, Qiu Jiangyan, You Bo, et al. Three-dimensional obstacle avoidance algorithm for manipulator [J]. *Control Engineering of China*, 2010, 17(5): 669 ~ 673. (in Chinese)
- 9 王其军,杜建军. MOTOMAN 机器人逆运动学新分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2010, 42(3):451 ~ 454.
Wang Qijun, Du Jianjun. A new solution for Inverse kinematics problems of MOTOMAN robot[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2010, 42(3): 451 ~ 454. (in Chinese)
- 10 贾庆轩,陈钢,孙汉旭,等. 基于 A* 算法的空间机械臂避障路径规划[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(13): 109 ~ 115.
Jia Qingxuan, Chen Gang, Sun Hanxu, et al. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(13): 109 ~ 115. (in Chinese)
- 11 尹建军,毛罕平. 基于断层切片透视的双目测量模型[J]. *江苏大学学报:自然科学版*, 2011, 32(3):249 ~ 253.
Yin Jianjun, Mao Hanping. Binocular measurement model based on fault slice perspective[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2011, 32(3): 249 ~ 253. (in Chinese)