微波处理对鲜湿面片褐变及其特性的影响

王瑞[1]，林江涛[1]，岳清华[1]，宋安琪[1]，宋喜雅[1]，苏东民[1,2*]

（1.河南工业大学粮油食品学院，河南郑州 450000）（2.郑州轻工业大学食品与生物工程学院，河南郑州 450001）

摘要：该研究探讨了微波处理小麦粉对鲜湿面片褐变及其特性的影响。利用微波技术处理小麦粉，测定鲜湿面片的色泽、小麦粉多酚氧化酶（Polyphenol Oxidase，PPO）活性，并通过分析面片水分分布、游离多酚含量、流变学特性以及小麦粉中蛋白质二级结构、巯基和二硫键变化，从而研究微波处理对鲜湿面片褐变及其特性的影响。研究结果表明：随着微波时间和功率的增加，鲜湿面片的白度呈现上升的趋势，在低微波功率下色泽无显著性差异，在较高功率 700 W，处理时间为 100 s 时白度会因糊化现象而下降；PPO 活性下降了 42.78%，游离多酚 24 h 内变化量与未处理组比较下降了 54.78%；面片弛豫时间 T_{22} 和 T_{23} 呈现先上升后降低的趋势，在中等强度处理时达到最大值；游离巯基整体呈现下降趋势，二硫键含量增加，在 700 W 处理 100 s 时分别为 1.29、4.38 μmol/g；蛋白质二级结构中 α-螺旋含量显著性下降，无规则卷曲含量显著性增加；在鲜湿面片的流变学特性中，G'和 G''均呈现先增大后减小的趋势，tanδ 呈现先减小后增大的趋势。综上所述，在微波功率为 700 W，处理时间为 80 s 效果最佳，该研究可为面制品行业提供一定理论基础。

关键词：微波处理；褐变；多酚氧化酶；白度；游离多酚

文章编号：1673-9078(2023)09-187-195 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.9.1143

Effect of Microwave Treatment on the Browning and Characteristics of Fresh and Wet Noodles

WANG Rui[1], LIN Jiangtao[1], YUE Qinghua[1], SONG Anqi[1], SONG Xiya[1], SU Dongmin[1,2*]

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

(2.College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The effects of microwave treatment of wheat flour on the browning and properties of fresh wet noodle were investigated in the present study. Wheat flour was microwaved, before the color of fresh wet dough sheet and polyphenol oxidase (PPO) activity were determined. Also, the effects of microwave treatment on the browning and its characteristics of fresh-wet noodle were studied through analyzing the changes in moisture distribution, free polyphenol content and rheological characteristics of dough sheet, as well as changes in the secondary structure of protein, sulfhydryl group and disulfide bond of wheat flour. The results showed that the whiteness of the fresh wet dough sheet increased with the increasea of microwaving time and microwave power. There was no significant difference in color at a low microwave power, but the whiteness of dough sheet decreased due to gelatinization of wheat flour at a high power of 700 W for 100 s. The PPO activity decreased by 42.78%, and the content of free phenolics decreased by 54.78% within 24 hours compared with the untreated group. The relaxation times T_{22} and T_{23} of the dough sheet increased first then decreased, and reached the maximum when a medium-intensity treatment was applied. The free thiol group showed a downward trend, whilst the content of disulfide bond increased, which were 1.29 and 4.38 μmol/g, respectively, for a 100-s treatment at 700 W. As for protein's secondary structure, the content of α-helices decreased significantly, whilst the content of random coils increased significantly. In terms of the rheological properties of fresh wet dough sheet, both the G' and G'' increased first then decreased, and Tanδ also decreased first then increased. In summary, the treatment with a microwave power of 700 W and treatment time of 80 s leads to the

引文格式：

王瑞,林江涛,岳清华,等.微波处理对鲜湿面片褐变及其特性的影响[J].现代食品科技,2023,39(9):187-195

WANG Rui, LIN Jiangtao, YUE Qinghua, et al. Effect of microwave treatment on the browning and characteristics of fresh and wet noodles [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(9): 187-195

收稿日期：2022-09-09

基金项目：河南省科技厅重大专项（141100110900）；国家自然科学基金-青年基金项目（32101985）

作者简介：王瑞（1997-），女，在读硕士研究生，研究方向：食品工程，E-mail：wrui202208@163.com

通讯作者：苏东民（1963-），男，博士，教授，研究方向：农产品谷物加工利用，E-mail：2150018152@qq.com

best outcome. This study provides a theoretical basis for the noodle industry.

Key words: microwave processing; browning; polyphenol oxidase; whiteness; free polyphenols

面条是我国传统主食之一，已有 2 000 多年历史。面条因制作工艺简单，食用方便等优点，受众人群较广。目前市场中主要有 3 类面条：干面条、方便面、鲜湿面条[1]。鲜湿面条与干面条相比，其制作工艺简单，口感更好，营养丰富，因此更受大众的喜欢[2]。然而生湿面水分含量高，成分复杂，在常温条件下贮藏易发生褐变，其主要外在表现为表面色泽变暗，且颜色分布不规则，严重影响外观，降低了产品的商业价值，这成为亟待解决的难点之一[3]。鲜湿面条色泽受很多因素的影响，内在因素包括蛋白质含量[4]、麦麸色泽、灰分含量[5]、多酚氧化酶[6]、类胡萝卜素、酚类化合物[7]和面粉色泽；加工参数等外部影响因素包括：磨粉提取率、破损淀粉、加盐量、加水量[8]、水分活度和 pH 值等。

已有研究表明，鲜湿面条的褐变主要有酶促褐变和非酶促褐变，酶促褐变主要过程是酚类物质在多酚氧化酶（Polyphenol Oxidase，PPO）的催化作用下，氧化酶为醌类物质，醌类物质再经过一系列反应生成深褐色色素类化合物[6,9]。因此降低 PPO 活性成为抑制褐变的关键。目前多数研究集中于化学方法，添加外源物质如柠檬酸、抗坏血酸[10]、磷酸盐[11]等；物理手段也有很多如冷等离子体处理[12]、臭氧处理[13]、高强超声[14]等。微波是一种电磁波，有着反射、穿透、吸收这三个特性，简单快捷，使用范围较广，主要被用于食品加热、杀菌、灭酶、成分萃取等[14]。同时它穿透性较强，且灭酶比较彻底，酶复活率低，因此在灭酶和灭菌方面有较大的使用价值。本文主要通过微波处理小麦粉，研究微波处理对鲜湿面条色泽及面片特性的影响，同时探索微波技术对面片褐变影响的原因，为防止鲜湿面条褐变提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 原料

F3 粉，取自于河南天香面业公司。

1.2 仪器与设备

CR-410 色彩色差仪，日本柯尼卡美能达公司；Micro MR-CL-I 核磁共振成像分析仪，苏州（上海）纽迈电子科技有限公司；哈克流变仪，德国赛默飞世尔科技有限公司；UV-4802S 紫外可见分光光度计，尤尼柯（上海）仪器有限公司；JHMZ-200 针式和面机，北京东方孚德技术发展中心；Freezone 6 Plus 真空冷冻干燥机，美国 Labconco 公司；JMTD-168/140 实验面条机，北京东方孚德技术发展中心；SPX-100 B-Z 恒温培养箱，上海迅博实业有限公司医疗设备厂。

1.3 实验方法

1.3.1 微波处理小麦粉

每次称取 100 g 小麦粉均匀平铺于 22 cm×22 cm 的微波专用托盘中，在研究微波功率对小麦粉的影响时，分别在 120、280、462、581、700 W 功率下处理 100 s；在研究微波处理时间对小麦粉的影响时，在 700 W 功率下，分别处理 40、60、80、100 s，经微波处理后的小麦粉放置至常温备用。

1.3.2 鲜湿面片的制作

称取处理后的小麦粉 100 g，加水量以未处理样品的 31%为基准，测定各处理后样品的水分，使最终面片含水量保持一致。使用针式和面机均匀搅拌 7 min 至面絮，面絮放置醒发箱熟化 20 min，随后以 3、2.5、2、1.5、1 mm 的压面机辊间距依次压延至 1 mm 面片，面片用于测定。

1.3.3 鲜湿面片色泽的测定

将制作的鲜湿面片放置于 25 ℃恒温培养箱中，使用色彩色差仪分别测定放置 0、2、4、6、8、24 h 的面片色泽，得到 L^*、a^*、b^*值，白度按照公式（1）计算：

$$H = 100 - \left[(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中：

H——样品白度值；

L^*——样品亮度值；

a^*——样品红色值；

b^*——样品黄色值。

1.3.4 PPO 活性的测定

参照张淼等[15]方法测定，并稍做修改。称取 4 g 样品，加入 20 mL 磷酸盐缓冲溶液（pH 值 6.0，0.2 mol/L），振荡后置于 4 ℃冰箱中浸提 12 h，以 4 000 r/min 离心 15 min，得到粗酶液。取 4 mL 磷酸盐缓冲液，加入 1 mL 澄清离心液置于 37 ℃恒温水浴锅中 3 min 后，再加入 1 mL 邻苯二酚溶液（0.1 mol/L），水浴 15 min 后测定 420 nm 处吸光值，以不加小麦粉样品为对照。PPO 活性按照公式（2）计算[16]：

$$X = \frac{A}{0.001 \times m \times t} \quad (2)$$

式中:

X——样品中多酚氧化酶活性，U;

A——吸光度;

0.001——活力单位换算系数;

m——样品质量，g;

t——反应时间，min。

1.3.5 鲜湿面片的水分分布测定

参照黄美琳[17]的方法测定，并稍做修改。称取1.0 g制作的鲜湿面片，用剪刀剪切成3 cm左右的细条，用聚四氟乙烯膜包裹细条，放入核磁共振试管中，然后利用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill 脉冲序列扫描得到横向弛豫时间 T_2。参数设置：采样点数 TD 为 40 000，采样频率 SW 为 100.0 kHz，采样间隔时间 TW 为 1 000 ms，累加次数 NS 为 4。检测结束后，利用 T_2 反演程序得出 T_2 弛豫时间繁衍谱图。

1.3.6 蛋白质二级结构分析

参照郭晓丹等[18]方法测定。在红外灯下取出干燥处理后的溴化钾固体在研钵中研磨，处理后的样品与研磨后的溴化钾以 1:100 的比例混合均匀并压片，用傅里叶红外光谱进行测定，扫描波长范围为 4 000~400 cm^{-1}，溴化钾为空白对照，采用 Omnic 软件分析找到酰胺Ⅰ带的位置（1 600~1 700 cm^{-1}），并使用 Peakfit 软件处理计算各特征峰的面积。

1.3.7 鲜湿面片动态流变学特性测定

参考 Yazar 等[19]方法，并稍作修改。将制作的鲜湿面片轧至 1 mm，使用模具切割成半径为 2 cm 的圆形片，放置于测试台上，面片周围涂抹硅油防止水分挥发。频率扫描参数设置：应变 0.1%，温度 30 ℃，频率 0.1~10 Hz，测定面片的弹性模量（*G*′）、黏性模量（*G*″），损耗因子由公式 tan*δ*=*G*″/*G*′得出。

1.3.8 多酚含量的测定

参照文献测定并稍做修改[20,21]。鲜湿面片经冷冻干燥后，研磨过 100 目筛，称取 1 g 研磨后样品至 10 mL 离心管内，加入 5 mL 70%（*V*/*V*）的甲醇（预热 70 ℃）水浴震荡培养 1 h，然后 2 000 r/min 离心 15 min，收集上清液，重复上述提取步骤，合并上清液，用甲醇溶液定容至 10 mL。多酚含量的测定：取 1 mL 上清液置于 50 mL 离心管内，加入 1 mL 福林酚试剂，避光反应 7 min，然后再加入 5 mL 的 7.5%（*m*/*m*）Na_2CO_3 避光反应 1 h，反应结束后测定 765 nm 处的吸光度。

标准曲线的绘制：采用浓度分别为 0、12.5、25、50、100、200 mg/L 的没食子酸溶液代替相同体积的上清液，根据多酚含量测定方法，得到吸光值-浓度标准曲线，*y*=0.008 8*x*+0.037 7（R^2=0.998 2）。

1.3.9 巯基、二硫键含量的测定

参照 Ellman's 试剂比色法测定[22]。75 mg 面粉样品用 1 mL Tris-甘氨酸缓冲液混匀后加 4.7 g 盐酸胍，用缓冲液定容至 10 mL。测定巯基时，取 1 mL 该液加 4 mL 脲-盐酸胍溶液和 0.05 mL Ellman's 试剂，于 412 nm 处测取光吸收值。测定二硫键时，取 1 mL 溶液，加 0.05 mL 巯基乙醇和 4 mL 脲-盐酸胍溶液，于 25 ℃保温 1 h，然后加入 10 mL 12%（*m*/*m*）三氯乙酸，继续于 25 ℃恒温 1 h，4 500 r/min 离心 15 min，用 5 mL 12%（*m*/*m*）三氯乙酸清洗沉淀物二次，将沉淀物溶于 10 mL 8 mol/L 脲中，加 0.05 mL Ellman's 试剂，测取 412 nm 处的吸光值。

1.4 数据处理

使用 Origin 2018 进行图表的绘制，使用数据分析软件 SPSS 对数据进行显著性分析。

2 结果与讨论

2.1 微波处理对面片色泽的影响

2.1.1 微波处理时间对面片色泽的影响

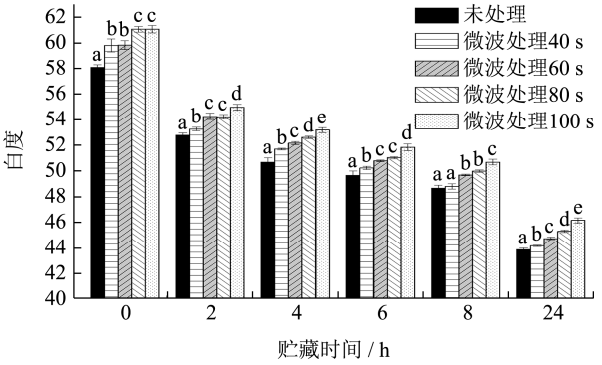


图 1 不同微波处理时间下面片 24 h 内白度变化

Fig.1 The whiteness change of the dough patch within 24 h under different microwave treatment times

注：图中不同字母表示差异显著（*P*<0.05）。图 2、5、6、7、8 同。

白度值通过 *L**、*a**、*b**计算得出，可直观表示鲜湿面片的色泽。在微波功率 700 W，不同微波处理时间条件下，鲜湿面片 24 h 内色泽变化如图 1 所示，不同处理条件下鲜湿面片 24 h 内白度呈现下降趋势，面片出现褐变现象，其中在 0~2 h 内面片褐变速度最快。经微波处理后的小麦粉制作的面片与未处理的相比，白度明显增加，面片白度随着微波处理时间的增加呈现上升的趋势，处理时间为 100 s 时，白度达到最大。鲜湿面片的褐变分为酶促褐变和非酶促褐变，其中酶促褐变主要是由于多酚氧化酶氧化多酚类物质，形成褐色的醌类物质。上述现象可能是因为微波加热导致

多酚氧化酶活性降低，生成的色素类物质减少，面片的白度增大。另外，微波加热处理后面片内部的水分状态发生改变，这也是可能导致面片色泽得到改善的原因。微波处理 100 s 时，小麦粉由于中间温度过高，散热不及时，容器中间部位会出现轻微糊化现象，小麦粉色泽变暗，面片色泽也会受到影响，这与余晓宇等[23]研究相似，在微波处理 80 s 时的面片 L^*值开始下降，由于高温发生美拉德反应，生成棕色类物质，面片色泽变暗。

2.1.2 微波功率对面片色泽的影响

不同微波功率条件下，处理 100 s 后的小麦粉制成的面片 24 h 内白度变化如图 2 所示。在不同功率处理条件下小麦粉制作的面片，白度在 24 h 内呈现下降趋势，未经处理小麦粉制作的面片褐变程度较大。同一时间内，随着微波功率的不断增大，面片白度值也不断增大，可能加热使其多酚氧化酶活性降低，抑制面片褐变。然而低微波功率处理（120 W）后小麦粉制作的面片在 24 h 后面片白度与未处理组无显著性差异，这可能是由于低微波功率虽然使其 PPO 活性降低，但是其影响较小，并不能改善面片的白度。

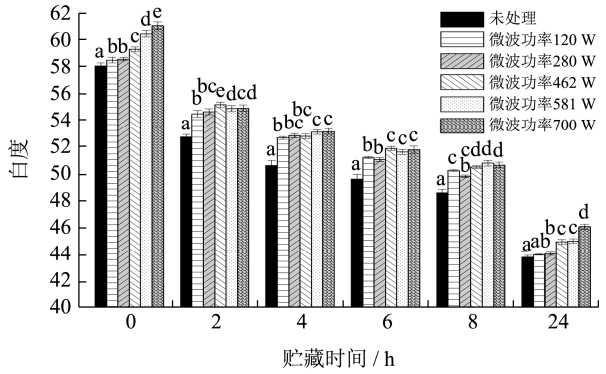


图 2 不同微波功率下面片 24 h 内白度变化

Fig.2 The whiteness change of the dough patch within 24 h under different microwave power

2.2 微波处理对小麦粉 PPO 活性的影响

微波用于酶的灭活是基于微波的热效应和非热生化效应。热效应是指微波作用于物料，物料表里同时吸收微波能，温度升高后使微生物体内蛋白质、核酸等分子变性，导致失活，从而达到灭酶的目的；非热生化效应主要是指在外电磁场的作用下物料中细胞膜发生功能障碍，使细胞正常代谢功能受到干扰和破坏，致使细胞 DNA 和 RNA 分子结构中的氢键松驰、断裂和重新组合，诱发基因突变、染色体畸变，从而中断细胞的正常功能，最终导致酶活力下降[24]。由图 3 和图 4 可知，微波处理后的面粉 PPO 活性下降，微波功率为 700 W 时，随着处理时间的增加，PPO 活性呈现下降趋势；在微波时间一定时，随着微波功率的增加，PPO 活性呈现下降趋势，在功率为 700 W，处理时间为 100 s 时，PPO 活性下降了 42.78%。Yadav 等[25]研究得出在 900 W 处理全麦粉 80 s，其活性下降了 93.39%，这可能是由于样品种类和初始分水的原因而导致的差异。PPO 可直接影响面片的褐变，其活性降低，面片褐变速度也会下降，其白度值增大。

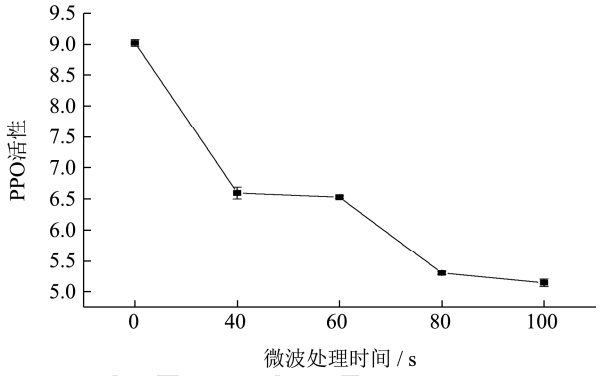


图 3 不同微波时间下小麦粉中 PPO 活性的变化

Fig.3 The PPO activity change in wheat flour under different microwave treatments times

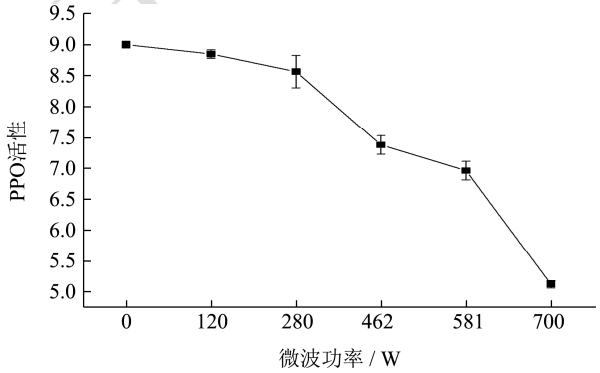


图 4 不同微波功率下小麦粉中 PPO 活性的变化

Fig.4 The PPO activity change in wheat flour under different microwave treatments power

2.3 微波处理对游离多酚含量的影响

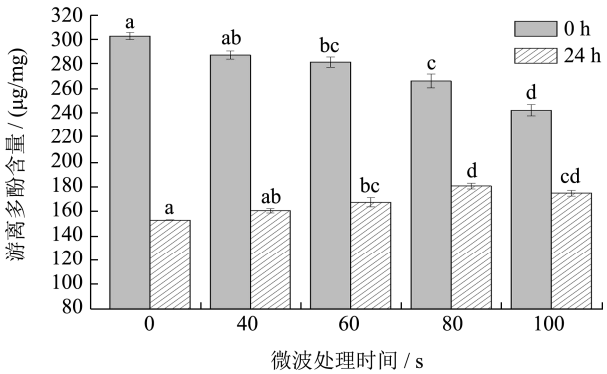


图 5 不同微波时间下面片 24 h 内多酚含量变化

Fig.5 The change of polyphenol content in dough patch within 24 h under different microwave times

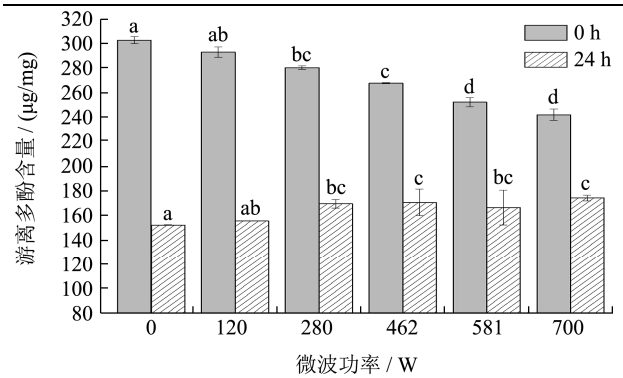


图 6 不同微波功率下面片 24 h 多酚含量的变化

Fig.6 The change of polyphenol content in dough patch within 24 h under different microwave power

小麦粉中的一些多酚类物质如绿原酸，在 PPO 的催化作用下可发生氧化褐变[11]，因此游离多酚含量的变化可用来评价褐变反应发生的程度。微波处理小麦粉对于面片多酚含量的影响如图 5 和图 6 所示。微波处理后，面片中游离多酚初始含量显著降低，且微波处理时间越长，功率越大，多酚含量下降的越多，是由于微波加热导致小麦粉中一部分多酚类物质氧化分解[26]，多酚含量减少。鲜湿面片放置 24 h 后，其多酚含量显著降低，同时微波处理时间越长，微波功率越大，储藏期间多酚含量的变化幅度越小，减缓了多酚类物质氧化反应。与未处理组比较 24 h 内减少量最大下降了 54.78%。鲜湿面片酶促褐变过程中多酚类物质的氧化是重要途径，经微波处理，可以显著降低游离多酚含量，同时减缓多酚类物质氧化造成的褐变过程。

2.4 微波处理对鲜湿面片水分分布的影响

采用核磁共振技术测定鲜湿面片水分分布。从结果分析，主要出现了 3 个不同的波峰，分别代表三种流动性不同的水分，分别为深层结合水、弱结合水和自由水。横向弛豫时间代表了水分与面片中组分的结合状态，横向弛豫时间越长，水的流动性越大，深层结合水、弱结合水和自由水依次是 T_{21}、T_{22}、T_{23}[18]。不同水分的含量用峰面积表示，分别为 A_{21}、A_{22}、A_{23}。

表 1 和表 2 分别为在不同微波功率和处理时间下处理面粉，制作的面片其 T_2 及对应的峰面积比例 A_2 的变化。随着微波功率和处理时间的增加，面片中深层结合水无显著性差异，然而弱结合水和自由水含量有不同程度的下降，且 T_{22}、T_{23} 也呈现下降趋势，说明微波处理后，弱结合水和自由水的水分状态发生改变，其流动性减小，转化为结合更为紧密的水。这可能由于微波处理导致面片结构发生改变，降低水的自由度，从而减缓褐变的发生。

表 1 不同微波时间小麦粉面片水分弛豫时间 T_2 及对应峰面积比例 A_2 的变化

Table 1 Variation of water relaxation time T_2 and corresponding peak area ratio A_2 of wheat flour flakes under different microwave times

不同微波处理时间小麦粉/s	T_{21}/ms	T_{22}/ms	T_{23}/ms	A_{21}/%	A_{22}/%	A_{23}/%
未处理	0.61±0.02^{a}	16.20±0.81^{a}	203.24±0.92^{a}	16.65±0.35^{a}	79.81±0.32^{a}	3.39±0.03^{a}
40	0.61±0.00^{a}	15.66±0.55^{a}	199.68±0.00^{b}	18.52±0.29^{b}	78.09±0.29^{b}	3.24±0.02^{b}
60	0.61±0.00^{a}	15.66±0.55^{a}	198.82±1.05^{b}	18.14±0.34^{b}	78.44±0.34^{b}	3.26±0.01^{b}
80	0.65±0.02^{a}	13.94±0.02^{b}	200.47±0.96^{b}	19.50±0.18^{c}	77.08±0.17^{c}	3.26±0.01^{b}
100	0.60±0.05^{a}	15.23±0.06^{ab}	200.47±0.96^{b}	19.49±0.22^{c}	77.07±0.23^{c}	3.26±0.01^{b}

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（P<0.05）。下表同。

表 2 不同微波功率小麦粉面片水分弛豫时间 T_2 及对应峰面积比例 A_2 的变化

Table 2 Variation of water relaxation time T_2 and corresponding peak area ratio A_2 of wheat flour flakes under different microwave power

不同功率处理小麦粉/W	T_{21}/ms	T_{22}/ms	T_{23}/ms	A_{21}/%	A_{22}/%	A_{23}/%
未处理	0.61±0.02^{a}	16.20±0.81^{a}	203.24±0.92^{a}	16.65±0.35^{a}	79.81±0.32^{a}	3.39±0.03^{a}
120	0.62±0.04^{a}	15.03±0.05^{b}	192.71±6.95^{abc}	18.71±0.47^{bc}	77.88±0.42^{bc}	3.27±0.05^{b}
280	0.67±0.02^{a}	14.96±0.00^{b}	188.20±0.00^{c}	18.12±0.22^{b}	78.47±0.19^{b}	3.26±0.02^{b}
462	0.59±0.05^{a}	14.93±0.04^{b}	190.17±2.41^{bc}	19.35±0.49^{c}	77.27±0.52^{c}	3.24±0.03^{b}
581	0.61±0.03^{a}	13.94±0.02^{c}	194.07±4.91^{abc}	19.12±0.11^{c}	77.39±0.08^{c}	3.33±0.05^{ab}
700	0.60±0.05^{a}	15.23±0.06^{b}	200.46±0.96^{ab}	19.49±0.22^{c}	77.07±0.23^{c}	3.24±0.01^{b}

2.5 微波处理对蛋白质二级结构的影响

蛋白质的二级结构主要有：α-螺旋、β-折叠、β-转角、无规则卷曲结构，是蛋白质结构和功能的基础。采用傅里叶红外仪器测定，找出酰胺Ⅰ带，各结构对应的特征峰分别为：1 600~1 639 cm^{-1} 为 β-折叠；

1 640~1 649 cm^{-1} 为无规则卷曲；1 650~1 659 cm^{-1} 为 α-螺旋；1 660~1 699 cm^{-1} 为 β-转角[18]。由表 3 和表 4 可知，随着微波功率和时间的增加，α-螺旋含量下降 11.96%，无规则卷曲结构含量增加 7.76%，β-折叠含量无显著性差异，β-转角出现先增加后减少的趋势，这与余晓宇等[23]研究结果一致，微波功率增加到一定程度后，有规则的蛋白质结构会向无规则转变，这可能是由于微波加热后，氢键受到破坏，螺旋、折叠等有序结构受到影响。

表 3 不同微波时间对蛋白质二级结构的影响

Table 3 Effect of different microwave time on protein secondary structure

不同微波处理时间小麦粉/s	α-螺旋/%	β-折叠/%	β-转角/%	无规则卷曲/%
未处理	25.40±0.06^{a}	33.56±0.29^{a}	25.43±0.16^{a}	15.61±0.11^{a}
40	17.05±1.20^{b}	33.29±0.57^{a}	31.14±0.22^{b}	18.52±0.29^{b}
60	15.42±0.75^{c}	34.78±0.68^{ab}	30.25±0.86^{b}	19.55±0.34^{c}
80	15.21±0.75^{c}	34.24±0.75^{ab}	29.08±0.66^{c}	21.47±0.18^{d}
100	13.44±0.08^{d}	35.23±0.06^{b}	27.96±0.21^{d}	23.37±0.13^{e}

表 4 不同微波功率对蛋白质二级结构的影响

Table 4 Effect of different microwave power on protein secondary structure

不同功率处理小麦粉/W	α-螺旋/%	β-折叠/%	β-转角/%	无规则卷曲/%
未处理	25.40±0.06^{a}	33.56±0.29^{a}	25.43±0.16^{a}	15.61±0.11^{a}
120	25.22±1.23^{a}	33.6±0.45^{a}	25.90±0.19^{a}	15.22±.29^{a}
280	23.55±0.34^{b}	33.42±0.12^{a}	26.89±0.10^{b}	16.14±0.34^{b}
462	20.00±0.67^{c}	35.33±0.34^{b}	25.17±0.11^{a}	19.50±0.18^{c}
581	17.34±0.70^{d}	35.13±0.10^{b}	26.21±0.11^{b}	21.32±0.21^{d}
700	13.44±0.08^{e}	35.23±0.06^{b}	27.96±0.21^{c}	23.37±0.13^{e}

2.6 微波处理对游离巯基和二硫键的影响

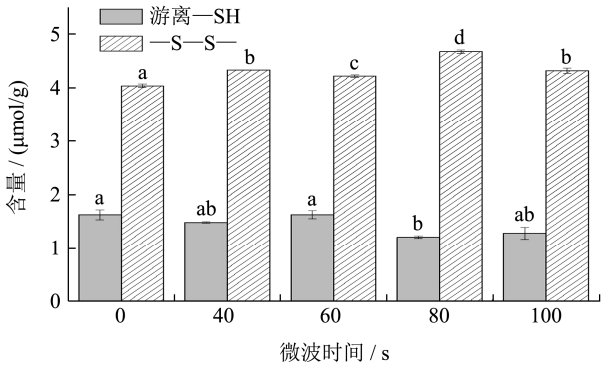


图 7 不同微波时间小麦粉中游离-SH、-S-S-的变化

Fig.7 Changes of free -SH and -S-S- in wheat flour under different microwave treatment times

面片制作时，小麦粉中的蛋白质和水相互作用，游离巯基（-SH）之间会相互连接，二硫键（-S-S）是由两个半胱氨酸残基巯基基团形成的共价键，它代表着蛋白质结构的稳定性[27]，在一定条件下，巯基和二硫键可以相互转化[28]，游离巯基和二硫键含量可以表示蛋白质的交联程度。游离巯基和二硫键在微波处理下的变化由图 7 和图 8 所示，随着微波功率和微波处理时间的增大，游离巯基呈现下降趋势，在较高功率和处理时间下（700 W，80 s 和 100 s）含量较低；二硫键含量先上升后下降，这可能是由于高温促进巯基交联氧化形成二硫键，这与之前的研究相似[17,29]，热处理可以促进面片中的游离巯基参与到蛋白质交联的过程中，形成分子内或分子间二硫键。当微波功率为 700 W，处理 100 s 时，二硫键减少，由于微波加热后，巯基和二硫键吸收的热能超过自身的键能，共价键发生断裂[30]。由以上结果分析，低温短时微波处理小麦粉可促进面片中面筋网络的形成，改变了面片中水分存在状态和迁移，可能影响褐变反应。

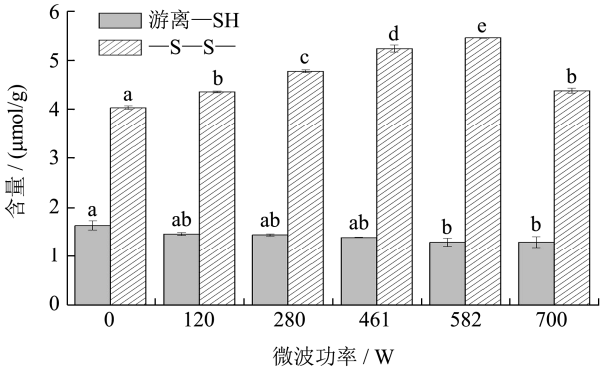


图 8 不同微波功率小麦粉中游离-SH、-S-S-的变化

Fig.8 Changes of free -SH and -S-S- in wheat flour under different microwave treatment power

2.7 微波处理小麦粉对鲜湿面片流变特性的影响

2.7.1 微波处理时间对鲜湿面片流变特性的影响

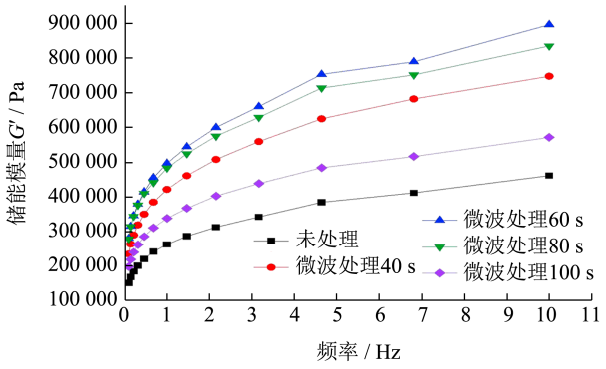


图 9 不同微波时间下面片 G'的变化

Fig.9 Variation of G' of the dough patch under different microwave times

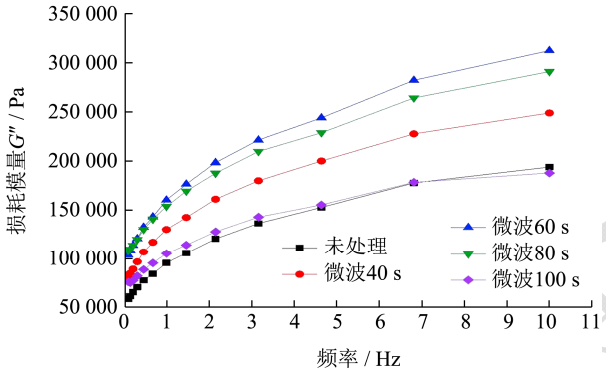


图 10 不同微波时间下面片 G''的变化

Fig.10 Variation of G'' of the dough patch under different microwave times

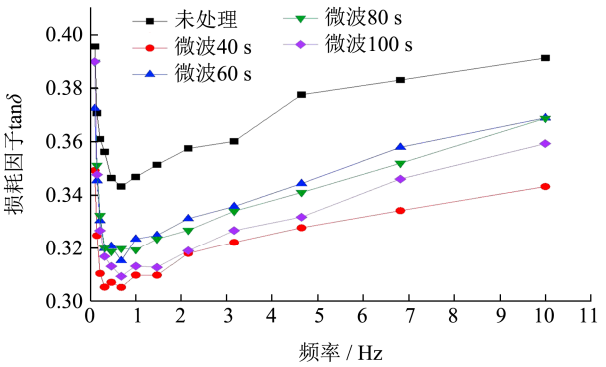


图 11 不同微波时间下面片 tanδ 的变化

Fig.11 Variation of tanδ of the dough patch under different microwave times

储能模量（G'）也称弹性模量，反映了鲜湿面片的弹性、维持初始状态的能力；损耗模量（G''）也称黏性模量，反映鲜湿面片的整体黏性、发生形变的能力[31]。储能模量和损耗模量的比值为损耗因子（tanδ），tanδ 值越小，高聚物含量多，面片结构更为紧密，反之聚合度差。由图 9 和图 10 可知，当微波处理时间在 40~60 s 时，G'和 G''呈上升趋势，当处理时间为 80 s 时，G'和 G''略有下降，可能由于时间的加长，小麦粉所受温度升高，巯基和二硫键减少，面筋网络的形成受到一定影响，致使面片的黏弹性下降。

2.7.2 微波功率对鲜湿面片流变特性的影响

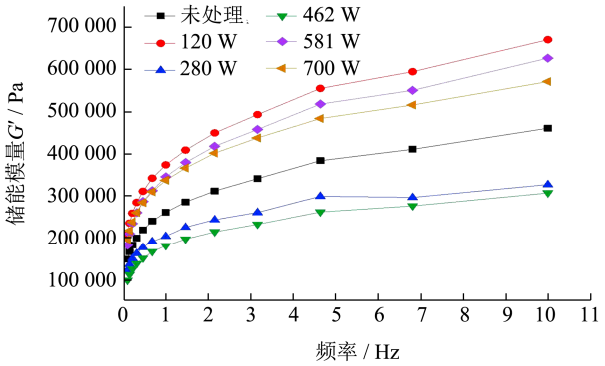


图 12 不同微波功率下面片 G'的变化

Fig.12 Variation of G' of the dough patch under different microwave power

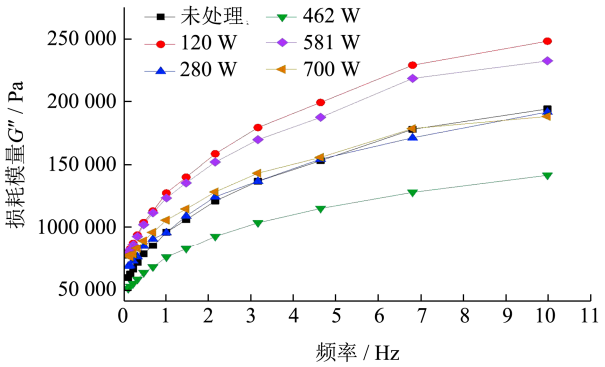


图 13 不同微波功率下面片 G''的变化

Fig.13 Variation of G'' of the dough patch under different microwave power

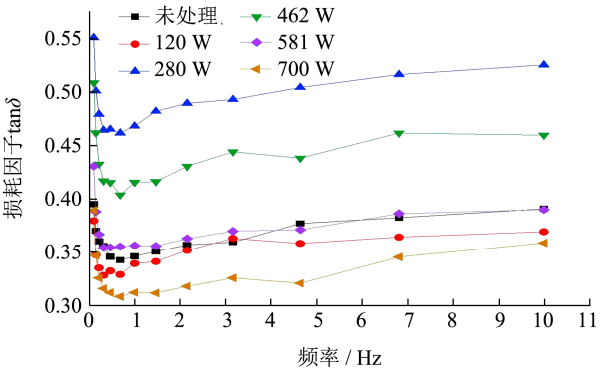


图 14 不同微波功率下面片 tanδ 的变化

Fig.14 Variation of tanδ of the dough patch under different microwave power

由图 12 和图 13 可知，经微波处理后，鲜湿面片 G'和 G''与对照组相比，呈上升趋势，面片的黏弹性增

大，在 120 W 时到达最大，与刘海波等[30]研究结果相似，可能由于淀粉受热膨胀，加水形成面片时与其蛋白质结合的更加紧密，从而增加了面片的黏性和弹性。由图 14 可知，tanδ 值均小于 1，说明面片体系中弹性比例较高，具有类固相特性[32]。除功率为 280 W 和 462 W，处理后面片 tanδ 值均小于对照组，弹性增大，这与赵梅等[33]研究结果一致，微波热效应促使蛋白质等组分聚合，分子量增大，能增加面团的弹性和类固体性质。

3 结论

本文使用不同的微波功率和微波时间处理小麦粉，从而研究微波处理对鲜湿面片褐变及其特性的影响。研究结果表明：微波处理后小麦粉中 PPO 活性显著下降，抑制褐变，鲜湿面片的白度增大。随着微波功率和微波时间的增大，PPO 活性减小，当 700 W 处理 100 s 时，由原来活性 9.00 U 降至 5.14 U。经微波处理后的面片中多酚含量的变化量小于未处理组；鲜湿面片弛豫时间 T_{22} 和 T_{23} 减小，说明面片内部水分状态发生改变，从而抑制褐变；小麦粉蛋白质二级结构向无序结构转变明显，同时巯基含量下降，二硫键含量升高，面片黏弹性增加，微波处理虽然可以抑制面片的褐变，但过度处理会导致小麦粉蛋白质结构的改变，应合理是使用该技术，以避免小麦粉品质变性，使用中等强度的微波功率和时间，结合其他技术达到抑制面片褐变的效果。

参考文献

[1] 程丽英,曹振霞,石奇磊,等.鲜湿面条褐变抑制剂的研究[J].粮食与油脂,2021,34(9):42-46.

[2] Fukuzawa S, Ogawa T, Nakagawa K, et al. Changes in color and texture of wheat noodles during chilled storage [J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry. 2016, 80(12): 2418-2424.

[3] 卢帮贵.鲜湿面条褐变控制技术研究[D].郑州:河南农业大学, 2012.

[4] Martin J M, Berg J E, Hofer P, et al. Divergent selection for polyphenol oxidase and grain protein and their impacts on white salted noodle, bread, and agronomic traits in wheat [J]. Crop Science. 2010, 50: 1298-1309.

[5] Zhang, Y, Quail K, Mugford D C, et al. Milling quality and white salt noodle color of Chinese winter wheat cultivars [J]. Cereal Chemistry, 2005, 82: 633-638.

[6] 王远辉,张琼琼,张亚茹,等.生鲜湿面褐变影响因素、机理及控制技术研究进展[J].河南工业大学学报(自然科学版), 2020,41(6):106-110,128.

[7] Asenstorfer R E, Wang Y, Mares D J. Chemical structure of flavonoid compounds in wheat (*Triticum aestivum* L.) flour that contribute to the yellow colour of Asian alkaline noodles [J]. Cereal Science. , 2006, 43: 108-119.

[8] Yili Ye, Yan Zhang, Jun Yan, et al. Effects of flour extraction rate, added water, and salt on color and texture of Chinese white noodles [J]. Cereal Chemistry, 2009, 86(4): 477-485.

[9] Bittner S. When quinones meet amino acids: Chemical, physical and biological consequences [J]. Amino Acids, 2006, 30(3): 205-224.

[10] 晁文,张中义,薛琰.鲜切面色泽变化的研究[J].粮油加工, 2010,8:67-69.

[11] 吴欣婷.鲜湿面的褐变机制及控制研究[D].无锡:江南大学, 2021.

[12] 王若兰,何鑫,王向阳,等.冷等离子体处理对小麦粉理化性质改善效果研究[J].粮食与油脂,2021,34(6):1-5,17.

[13] Li M, Peng J, Zhu K X et al. Delineating the microbial and physical-chemical changes during storage of ozone treated wheat flour [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2013, 20: 223-229.

[14] Habus M, Novotni D, Gregov M, et al. Influence of particle size reduction and high-intensity ultrasound on polyphenol oxidase, phenolics, and technological properties of wheat bran [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(3): e15204.

[15] 张淼,张楚楚,彭晶,等.微波处理对全麦粉及全麦生鲜面中 PPO 和微生物的抑制研究[J].中国粮油学报,2014,29(3): 7-10,15.

[16] LS/T 6124-2017,粮油检验 小麦粉多酚氧化酶活力的测定 -分光光度法[S].

[17] 黄美琳.小麦粉在加工过程中受热对其品质的影响及机理研究[D].郑州:河南工业大学,2020.

[18] 郭晓丹.小麦粉吸水速率与其组分的关系及对面团品质的影响[D].郑州:河南工业大学,2021.

[19] Yazar G, Duvarci O, Tavman S, et al. Effect of mixing on LAOS properties of hard wheat flour dough [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 190: 195-204.

[20] Bai Y P, Guo X N, Zhu K X, et al. Shelf-life extension of semi-dried buckwheat noodles by the combination of aqueous ozone treatment and modified atmosphere packaging [J]. Food Chemistry, 2017, 237(15): 553-560.

[21] Yu K, Zhou H M, Zhu K X, et al. Increasing the physicochemical stability of stored green tea noodles: Analysis of the quality and chemical components [J]. Food

Chemistry, 2019, 280: 262-262.

[22] 罗明江,罗春霞,吴赣香.Ellman's 试剂比色法测定食品中蛋白质的巯基和二硫键[J].郑州粮食学院学报,1986,1:92-95.

[23] 余晓宇,陈洁,周智.微波处理面粉对面带色泽及面条品质的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2017,38(4):35-41.

[24] 张玉荣,周显青,果玉茹.小麦胚微波灭酶工艺参数研究[J].河南工业大学学报(自然科学版),2008,2:7-10.

[25] Yadav D N, Patki P E, Sharma G K, et al. Effect of microwave heating of wheat grains on the browning of dough and quality of chapattis [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2008, 43: 1217-1225.

[26] 赵钜阳,夏秀芳,孔保华,等.微波加热对食品中酚类物质的含量及抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2012,33(13):395-399.

[27] Li M, Zhu K X, Peng J, et al. Delineating the protein changes in Asian noodles induced by vacuum mixing [J]. Food Chemistry, 2014, 143(7): 9-16.

[28] Manu B T, Prasada Rao U J S. Influence of size distribution of proteins, thiol and disulfide content in whole wheat varieties [J]. Food Chemistry, 2008, 110(1): 86-95.

[29] HU Yueming, WANG Lijuan, LI Zaigui. Modification of protein structure and dough rheological properties of wheat flour through superheated steam treatment [J]. Journal of Cereal Science, 2017, 76: 222-228.

[30] 刘海波,廖超,郑万琴,等.微波处理小麦面粉对淀粉及蛋白性质的影响[J].食品与发酵工业,2020,46(14):91-97.

[31] Guo L, Tao H, Cui B, et al. The effects of sequential enzyme modifications on structural and physicochemical properties of sweet potato starch granules [J]. Food Chemistry, 2019, 277(30): 504-514.

[32] WANG Yanli, BAI Yuxiang, JI Hangyan, et al. Insight into rice starch degradation by maltogenic α-amylase: Effect of starch structure on its rheological properties [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124(10): 7289-7294.

[33] 赵梅,韩传武,宋俊男,等.微波处理对全麦粉理化性质及全麦鲜湿面品质的影响[J].中国粮油学报,2019,34(1):18-23.