

炒制对燕麦粉风味特性及面团形成的影响

王佩瑶, 张美莉*

(内蒙古农业大学食品科学与工程学院 呼和浩特 010018)

摘要 研究炒制对燕麦粉的风味特性及面团特性的影响。燕麦粉按炒制程度分为生燕麦粉、半熟燕麦粉和熟燕麦粉。采用电子鼻测定其风味成分,采用主成分分析等方法综合判断不同处理方式的燕麦面团的风味特性,研究不同炒制程度以及和面水温度条件下燕麦面团的理化特性。结果表明,随着炒制程度的增强,燕麦粉直链淀粉含量显著升高($P<0.05$),溶解度和膨胀度随着时间的延长呈先增加后减少的趋势;炒制后的燕麦粉的起始温度降至 60.07 °C,峰值温度和热焓值逐渐降低,且炒制未改变燕麦淀粉的晶型结构。扫描电镜图显示熟制燕麦粉的淀粉颗粒表面有更多的凹陷,随着和面水温度的升高,面团黏聚性增加。炒熟后的样品以及用 100 °C 水和面的面团,其醛类物质及烷烃类芳香成分显著增加。研究表明炒熟的燕麦粉加工性能最优,面团风味和面团理化特性最佳。

关键词 燕麦; 炒制程度; 理化性质; 风味特性; 面团特性

文章编号 1009-7848(2024)07-0269-09 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2024.07.027

燕麦主要有裸燕麦和皮燕麦两种,为禾本科草本植物。在我国,燕麦种植已有较长的历史,且多为裸籽粒类型,播种面积广,主要作为粮食食用^[1]。燕麦中的蛋白质相较于其它谷物更加均衡^[2],富含维生素和不饱和脂肪酸,燕麦中含有的 β -葡聚糖,具有降血脂和降胆固醇的作用^[3]。传统燕麦食品加工需要用到“三熟”工艺(炒熟、烫熟、蒸熟),其中炒制可以改善食品的风味、质地,被广泛应用于燕麦生产中^[4]。燕麦在炒制过程中,经过美拉德反应、脂肪氧化及焦糖化等反应,其香气种类和含量各不相同,经过这几种反应,使其具有独特的风味特征。徐托明^[5]研究了不同炒制程度的燕麦茶的香味差别,结果表明,烘炒时间长的样品具有较低的气味强度,与烘炒时间短的样品相比存在显著差异。曹汝鸽等^[6]研究表明焙炒处理对燕麦风味有较大的影响。目前,关于燕麦风味的研究主要集中在燕麦类产品的感官评价上,对不同炒制时间燕麦粉的理化性质以及风味的研究很少。本文对燕麦粉进行不同程度的炒制处理,研究其理化性质变化,以及对燕麦面团风味特性和形成特性的影响,以期为提高燕麦的加工品质奠定理论基础。

收稿日期: 2023-07-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1600704)

第一作者: 王佩瑶,女,硕士生

通信作者: 张美莉 E-mail: zhangmeili22@sina.com

1 材料与方法

1.1 材料及试剂

燕麦籽粒,内蒙古西贝餐饮集团股份有限公司;其它化学试剂均为分析纯级。

1.2 仪器及设备

Evolution 220 紫外-可见分光光度计,赛默飞世尔科技公司;扫描电子显微镜 TM4000,日本株式会社;红外光谱仪 IR Affinity-IS,日本岛津公司;高速离心机 3-18K,赛多利斯有限公司;DSC-60 plus 差示扫描量热仪,日本岛津公司;PEN3 型电子鼻传感器,德国 Aisense 公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理 参考文献[7]的方法,将燕麦籽粒清洗、润麦,静置 14 h 后,一部分燕麦籽粒在室温下晾干后磨粉,过 60 目筛,此样标记为“生粉”;一部分入锅分别炒制 7 min 和 15 min 后盛出,待温度降至 20 °C 时磨粉,过 60 目筛,记为“半熟粉”和“熟粉”。磨粉后装袋,4 °C 冰箱冷藏保存备用。

1.3.2 燕麦粉中直链淀粉含量的测定 参考文献[8]和[9]的方法,准确称取不同炒制程度的燕麦粉样品 0.1 g,放入 100 mL 容量瓶中。加入 95%乙醇 1 mL 和 9 mL 的 1 mol/L 氢氧化钠溶液,将容量瓶加热于沸水浴中 10 min,室温冷却后加蒸馏水定容。向 100 mL 容量瓶中加入 5 mL 样品溶液,其中装有一半蒸馏水,然后加入 1 mL 的 1 mol/L 乙酸溶液,将试样进行酸化,加入 1.5 mL 碘液,彻底混

合后,加入蒸馏水定容后静置 20 min。用 0.09 mol/L 5 mL 的氢氧化钠溶液取代试样,制备空白溶液。在波长 620 nm 处,通过将空白试剂调零,测定样品的 OD 值。再利用标准曲线计算出样品中直链淀粉的含量,该含量是由标准样品所确定的。

1.3.3 燕麦粉在不同炒制程度下的溶解性和膨胀性测定 燕麦粉的溶解度和膨胀度的测定参照张晶等^[10]的方法并加以改动。将 0.6 g 燕麦粉与 30 mL 蒸馏水放入 50 mL 的离心管中,充分混合。分别在 55, 65, 75, 85, 95 °C 下水浴,振荡 30 min 后,3 000 r/min 离心 20 min,记录沉淀物的质量,上清液在 105 °C 下干燥至恒重。根据下列公式,计算溶解度(S)和膨胀度(B)。

$$\text{溶解度}(\%) = \frac{M_a}{M_w} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{膨胀度}(\%) = \frac{M_p}{M_w(100-S)} \times 100 \quad (2)$$

式中: M_a 为上清液烘干至恒重后的质量,g; M_w 为燕麦粉质量,g; M_p 为离心后沉淀物质量,g。

1.3.4 热特性的测定 参考文献[11]的方法,称取 3 mg 不同炒制程度的燕麦粉样品,放入铝制坩埚中,加入 9 μ L 去离子水,密封压盖。以空铝质坩埚为对照,温度范围为 40~200 °C,温度上升速率为 10 °C/min,测定起始糊化温度、最高温度、终止温度及热焓值。

1.3.5 燕麦粉红外光谱扫描 在 105 °C 下,将燕麦粉和溴化钾粉末干燥 3~4 h,以去除水分对吸收峰的干扰。称取 1.5 mg 试样和 150 mg 溴化钾粉末,放于研钵中研磨,压片,抽真空,将样品薄片放入样品架上扫描,扫描波数为 400~4 000 cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描次数 64 次,并绘制红外光谱图。

1.3.6 扫描电镜检测燕麦粉和面团形态 将双面导电胶粘于载物台上,用棉签沾取少量燕麦粉样品,轻轻涂抹于导电胶上,用剪刀剪下一小块面团,用镊子轻放于导电胶上,进行观察并拍照,加速电压为 15 kV。

1.3.7 不同炒制程度燕麦面团风味特性的测定 参考文献[12]的方法,分别称取生燕麦粉、半熟燕麦粉及熟燕麦粉各 20 g,置于不锈钢面盆中,每种粉分别添加凉水(20 °C)和热水(100 °C)和面,共

制备 6 种面团。称取 5 g 面团放入 10 mL 专用瓶中,在 25 °C 恒温条件下,用电子鼻进行检测。电子鼻检测条件:起始进样流量 300 μ L/min,采样间隔 1 s,清洗时间 90 s,检测时间 180 s,零点修剪时间 1 s。在对数据进行分析与处理的过程中,选择传感器信号稳定之后的数值(一般为 200 s),每组样品 3 次平行重复。

1.3.8 面团质构特性测定方法 将上述 6 种面团分别制成 2 cm×1.5 cm×1.5 cm 的长方体面团,进行质构特性测试(Texture profile analysis,TPA),选择硬度、弹性和黏聚性 3 个物理量。面团 TPA 测试参数:P36 探头,应变 50%,探头测前、测中和测后速度均为 1.5 mm/s,两次测定时间间隔为 5 s。

1.4 数据处理

Origin 对数据进行整理并作图,SPSS 进行差异性分析。

2 结果与分析

2.1 不同炒制程度对燕麦粉直链淀粉和支链淀粉含量的影响

不同炒制程度燕麦粉直链淀粉和支链淀粉测定结果见表 1。经过不同程度的炒制后,燕麦粉直链淀粉含量有所升高($P<0.05$),炒制后熟粉直链淀粉含量为 35.94%,比未炒制的生粉直链淀粉含量高 13.61%。有研究表明,燕麦中直链淀粉含量对淀粉的糊化温度、黏度以及热稳定性有影响,对燕麦面条的断条率和蒸煮损失率也有一定影响^[13-14]。随着炒制时间的延长,直链淀粉含量显著增加,主要原因是在受热过程中,淀粉分子链断裂,双螺旋结构降低,支链或较长直链淀粉的糖苷键断裂,使得直链淀粉含量升高^[15]。据 Gunaratne 等^[16]报道,加热破坏了晶体结构和非晶态区域的

表 1 不同炒制程度燕麦粉直链淀粉和支链淀粉含量
Table 1 Oat flour amylose and pullulan content
of different degrees of stir-frying

样品	直链淀粉/%	支链淀粉/%
生粉	22.33 ± 0.18 ^c	52.89 ± 0.17 ^a
半熟粉	32.60 ± 0.31 ^b	29.5 ± 0.12 ^b
熟粉	35.94 ± 0.06 ^a	7.91 ± 0.23 ^b

注:同一列不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

双螺旋解离,从而引起聚合物链的相互作用,导致支链淀粉长链解聚。

2.2 不同炒制程度对燕麦粉溶解度和膨胀度的影响

不同炒制程度燕麦粉的溶解度和膨胀度结果见图 1、图 2。直链、支链淀粉含量和分子质量对溶解度与膨胀度有一定的影响。直链淀粉和脂质在 55~65 °C 时相互作用增强,抑制淀粉颗粒吸水膨胀,导致燕麦粉的溶解度和膨胀度较低。从 75 °C 开始,燕麦粉溶解度开始上升,由于温度升高,当水分渗入后,淀粉颗粒会吸水、膨胀,部分未结晶

直链淀粉由于加热而溶解,从而提高溶解度。由图 2 可知,随着温度升高,燕麦粉膨胀度逐渐增大。在升温过程中,由于无限接近淀粉的糊化温度,微晶体结构松动,淀粉中的极性基团会与水结合,吸收周围的水分,提高其膨胀度^[17]。温度上升,油脂覆盖在淀粉粒子表面形成薄膜,抑制了淀粉颗粒的溶解度和膨胀度^[18]。熟粉中含有更多的直链淀粉,部分脂质和蛋白与逸出的直链淀粉结合形成复合物,包裹淀粉颗粒,阻碍内部物质进一步溶于溶液,因此膨胀度下降。

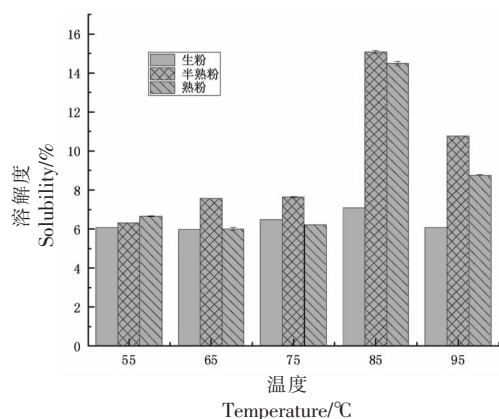


图 1 不同炒制程度对燕麦粉溶解度的影响

Fig.1 Effect of solubility of oat flour with different degrees of stir-frying

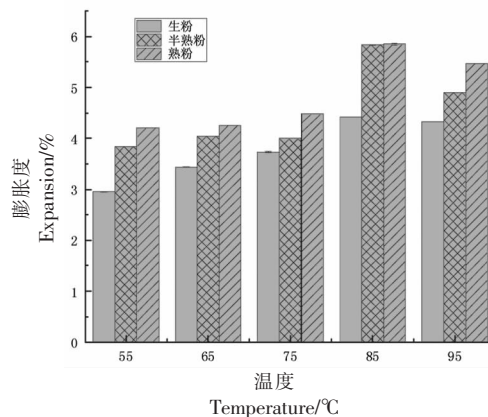


图 2 不同炒制程度对燕麦粉膨胀度的影响

Fig.2 Effect of expansion of oat flour with different degrees of stir-frying

2.3 不同炒制程度对燕麦粉热特性的影响

糊化焓是淀粉糊化时,双螺旋结构被破坏所需的能量体现^[19]。不同炒制程度下的热力学参数见表 2。随着炒制时间的延长,燕麦粉的起始温度(T_0)、峰值温度(T_p)和热焓值(ΔH)均显著降低($P < 0.05$)。生粉的峰值温度最高为 116.63 °C,熟粉的峰值温度最低为 89.78 °C。淀粉的糊化速率随温度升高而降低,经过炒制高温热处理,燕麦粉中的淀粉被部分糊化或颗粒受损坏,导致峰值温度降低。

淀粉热力学性质因燕麦粉中 β -葡聚糖、脂质、蛋白质等因素的影响而变化^[15]。

糊化焓是淀粉糊化所需要的能量,它是衡量淀粉粒子排列方式的一个重要参数^[15,20]。生粉的热焓值最大为 3.69 J/g,其次半熟粉为 2.72 J/g,熟粉为 1.46 J/g。生粉的 ΔH 较高,表明生粉中的淀粉晶体结构比较完整。经过炒制处理后,燕麦粉热焓值下降,可能是因为炒制使得燕麦粉中淀粉内部由支链淀粉分子形成的双螺旋结构遭到破坏,

表 2 不同炒制程度燕麦粉热特性参数

Table 2 Thermal characteristics parameters of oat flour with different stir-frying degrees

样品	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H_{\text{gel}}/(\text{J/g})$
生粉	110.79 ± 0.37^a	116.63 ± 1.61^a	154.21 ± 0.47^a	3.69 ± 3.92^a
半熟粉	90.08 ± 2.30^b	103.70 ± 0.91^b	123.71 ± 7.16^b	2.72 ± 2.88^b
熟粉	60.07 ± 0.36^c	89.78 ± 3.20^c	123.21 ± 0.59^b	1.46 ± 3.10^c

注: T_0 为起始温度; T_p 为峰值温度; T_c 为终止温度; ΔH_{gel} 为糊化焓。

降低了糊化焓值,炒制时间越长,糊化的程度越高^[15]。DSC 分析发现,在淀粉重结晶熔融时,存在一个吸热峰,融化晶体所需要的热量随着峰面积的增大而增加,老化程度随着结晶含量和融化焓值的增大而增加^[21-22]。结果表明,经过炒制后燕麦粉热焓值降低,生粉老化程度较大。

2.4 不同炒制程度燕麦粉红外光谱图分析

不同炒制程度燕麦粉的红外光谱图,如图3所示。3种燕麦粉的红外吸收光谱图表现出相似的峰形和曲线趋向。光谱在800~1200 cm^{-1} 范围内,代表C-O、C-C伸缩振动和C-OH弯曲振动,3421 cm^{-1} 处为O-H伸缩振动峰,2926 cm^{-1} 和1654 cm^{-1} 处为C-H伸缩振动峰和C=O伸缩振动峰。如图3所示,炒制后的燕麦粉样品与未处理的燕麦粉相同,没有显示任何新的吸收峰,表明既没有产生新的化学基团,又没有破坏现有的化学基团。这表明在热处理期间淀粉分子不会与其它成分发生化学反应^[23]。根据Bajer等^[24]的研究显示,羧酸、醇或淀粉的O-H活性变化随着3000~3500 cm^{-1} 范围内的光谱变化,初级和次级酰胺的N-H活性也随之变化。随着炒制程度的增强,-OH峰值在3421 cm^{-1} 附近增加,表明热处理可以促进O-H和N-H重叠变形的对称振动。与未处理燕麦粉相比,炒制后燕麦粉中的-CH₂-在2926 cm^{-1} 处增加了不对称延伸振动的糖类甲基C-H,这主要是因为燕麦粉的糊化作用。燕麦粉的蛋白质会在酰胺I区(1600~1700 cm^{-1})处出现吸收峰,C=O的伸缩振动与酰胺I区有关。如图3所示,燕麦粉中C=O的伸缩振动达到1654 cm^{-1} ,说明在加热过程中,蛋白质-淀粉-脂质复合物形成脂肪伸展的C=O振动^[25]。共轭羰基C-O-H的形变振动是导

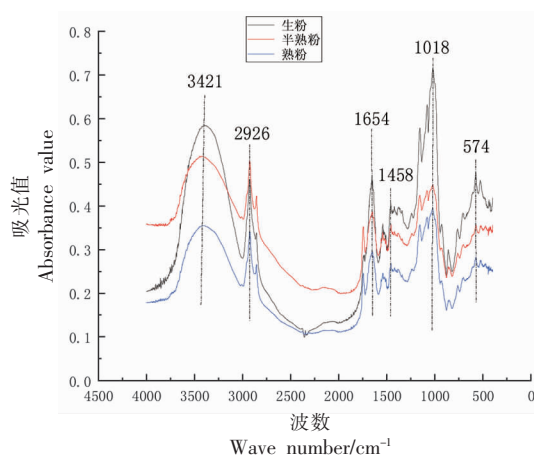


图3 不同炒制程度燕麦粉红外吸收光谱图
Fig.3 Infrared absorption spectra of oat flour with different degrees of stir-frying

致1458 cm^{-1} 处红外光谱这一现象的主要原因。

2.5 不同炒制程度燕麦粉 SEM 观察

3种燕麦粉 SEM 结果见图4。3种燕麦粉中的淀粉颗粒形状各异,有圆形、椭圆形等。淀粉颗粒相互黏合,可能是因为燕麦粉中的水分、蛋白质等物质所导致。生燕麦粉(图4a)显示存在圆形或不规则形状的淀粉颗粒。淀粉颗粒表面光滑或有裂隙和压痕,大淀粉颗粒有可能是小淀粉颗粒形成的团聚体^[26]。大的淀粉颗粒经过炒制(图4b),由于糊化,出现了更多的压痕,导致淀粉形态性质发生变化。熟粉(图4c)的淀粉颗粒受热处理影响较大,炒制完全,表现为单个颗粒的团簇形成,而小淀粉颗粒较少,表面粗糙。在加热过程中,淀粉的糊化作用会使其形貌特征发生变化,使得熟制后的燕麦粉淀粉颗粒表面有较大凹痕^[27]。

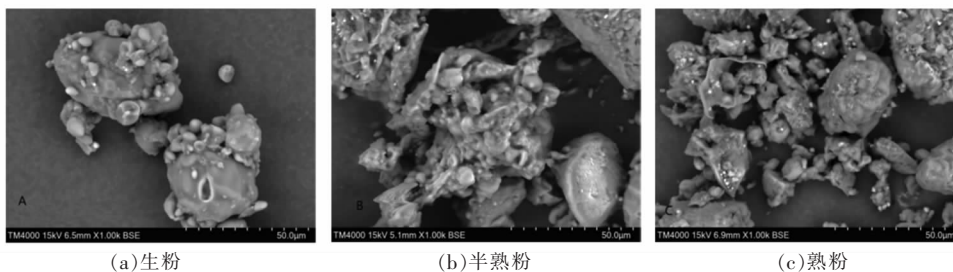


图4 不同炒制程度燕麦粉 SEM 图(1000×)

Fig.4 SEM images of oat flour with different stir-frying degrees (1000×)

2.6 不同炒制程度及和面水温度对燕麦面团风味特性的影响

PEN3 电子鼻包括 10 个传感器,用 10 种传感器对 6 组燕麦面团的响应值作面团雷达分析图(图 5)。图中不同颜色和形状代表不同炒制程度、和面水温度的燕麦面团。表 3 是不同物质的化学感应器的反应类型。

由图 5 可知,W1C、W5S、W1S 和 W1W 4 个传感器对各组面团的响应值都比较大。其中熟粉面团的响应值显著大于生粉面团的响应值。还原糖和氨基酸之间的美拉德反应、焦糖化反应及 Strecker 降解反应产生了杂环类和含硫化物。醛能赋予食品特殊的典型风味,它主要来源于谷物中不饱和脂肪酸的碳碳双键自动氧化和酶解氧化,在不饱和脂肪酸与醛氧化分解的过程中,会产生醇和醛的混合物,也有一些可能来自还原糖和氨基酸的美拉德反应^[29]。Dach 等^[30]研究表明在炒制过程中,燕麦粉和燕麦面团的微弱谷物状香气发生了变化,产生了强烈的烘烤、爆米花状香气属性。Bai 等^[31]研究燕麦麸中的亚油酸在蒸制时,易氧化成呋喃类物质。有报道称经干热处理后的面团降低了吸水率,加强了蛋白质网络结构,延长了形成时间^[32]。在本研究中,面团结构的变化以及淀粉分子与风味之间的相互作用应该是风味品质变化的原因。

由图 6 可知,不同种类面团的风味特性存在差异,PC1、PC2 贡献值合计 84.4%,可较好地反映出样品的主要信息,PC1、PC2 的贡献率分别为 49.2%和 35.2%。将样品大体在 PC1 上分为 2 个区域,熟粉凉水和热水面团在同一区域,其它面团空间区域接近,说明风味特性趋于平稳。其中熟粉面团对应的 X 轴数值最大,结合传感器对每个样品的响应值可见,熟粉面团的挥发性气味最强。

2.7 不同炒制程度、和面水温度的燕麦面团 SEM 观察

图 7 为不同炒制程度燕麦粉制作的面团电镜图,和面水分为凉水(20℃)和热水(100℃)。在低温时,淀粉不会发生膨胀,水温较低时,淀粉颗粒表面平滑^[33];随着水温度的增加,淀粉粒子的形变程度也在增加,淀粉颗粒几乎暴露在外,形变严重,周围可见片状层叠的淀粉碎片,淀粉颗粒已经

表 3 对不同物质的化学感应器的反应类型^[28]

Table 3 Types of reactions of chemical sensors for different substances^[28]

阵列序号	传感器名称	性能描述
1	W1C	芳香成分,苯类
2	W5S	灵敏度高,对氮氧化物很灵敏
3	W3C	芳香成分灵敏,氨类
4	W6S	主要对氢化物有选择性
5	W5C	短链烷烃香气组分
6	W1S	甲基类灵敏度
7	W1W	硫化物灵敏度
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	对有机硫化物敏感的香气组分
10	W3S	长链烷烃灵敏度

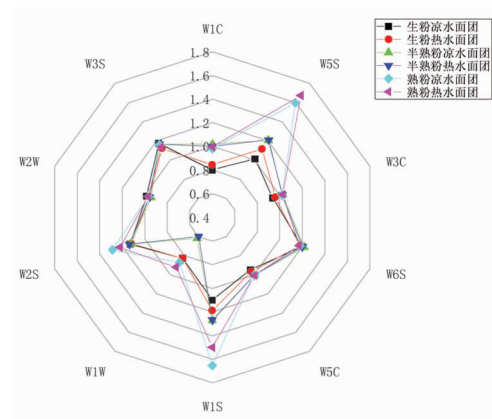


图 5 不同和面水温度燕麦面团电子鼻雷达图

Fig.5 Electronic nose radar diagram of oat dough with different mixing water temperature

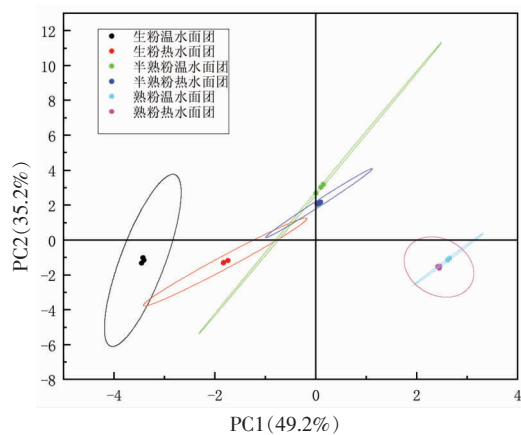


图 6 不同和面水温度燕麦面团电子鼻主成分分析

Fig.6 Principal component analysis of e-nose of oat dough with different mixing water temperature

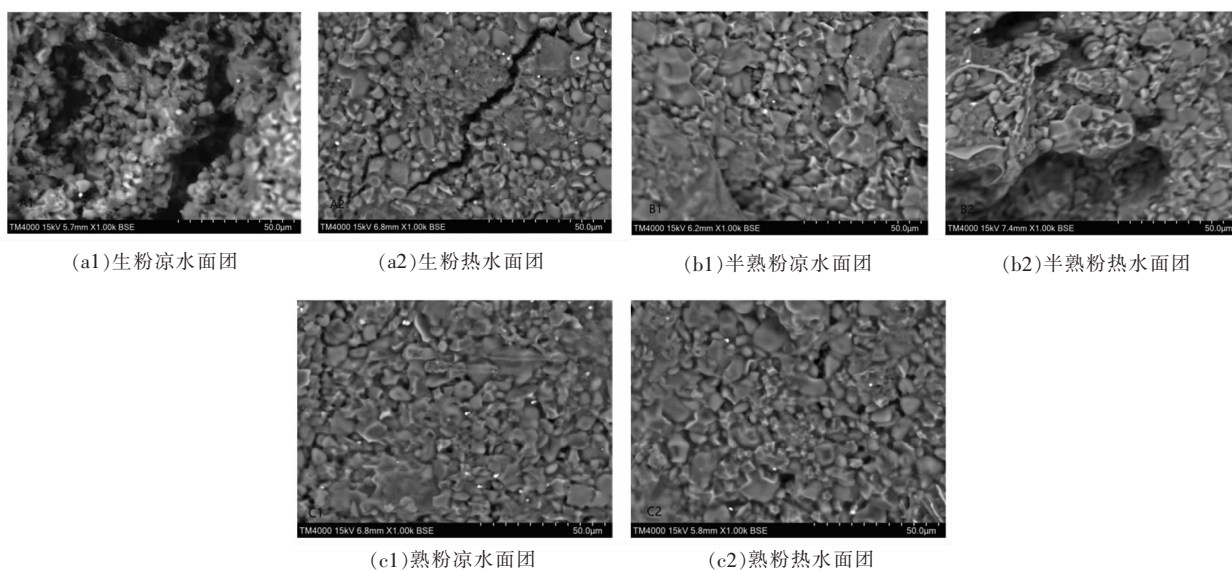


图7 不同炒制程度及和面水温度的燕麦面团 SEM 图(1 000×)

Fig.7 SEM diagram of oat dough with different stir-frying degrees and mixing water temperature (1 000×)

完全糊化成为片状^[34]。

2.8 不同炒制程度、和面水温度对燕麦面团质构特性的影响

硬度、弹性和黏聚性是面团质构特性的重要指标,能够体现面团的质地以及结合程度。不同炒制程度的燕麦粉在不同和面水温度条件下的面团质构特性如表4所示。3种不同炒制程度燕麦粉在不同和面水温度下制成的面团,其硬度、弹性和黏聚性逐渐升高($P<0.05$)。燕麦粉经过不同程度的炒制, β -葡聚糖含量的增加对面团的黏弹性有显著影响。汪磊^[35]研究发现,在一定的加水量下,

燕麦 β -葡聚糖保水性好,使其分子间的相互作用增强,从而增大了面团的硬度,导致面团变硬,延展性降低。面团的黏聚性增加,可能是经过炒制后,燕麦粉中糊化的淀粉颗粒吸水溶胀后产生较高的黏性,增强了面团的结合力^[36]。在面团制备中,和面水温度是影响因素之一,淀粉在低温下的水溶性较差,故而颗粒不会膨胀,使得面团形成时间延长。当水温升高时,淀粉的吸湿性会大大增强并膨胀,形成黏度很高的溶胶,面团的硬度、黏弹性等变化显著。

表4 不同炒制程度及和面水温度的燕麦面团质构特性

Table 4 Texture characteristics of oat dough with different stir-frying degrees and mixing water temperature

样品	硬度	弹性	黏聚性
生粉凉水面团	774.71 ± 51.46 ^c	0.13 ± 0.01 ^c	0.10 ± 0.01 ^c
生粉热水面团	1 449.08 ± 11.35 ^a	0.12 ± 0.01 ^c	0.12 ± 0.01 ^c
半熟粉凉水面团	976.91 ± 216.20 ^{bc}	0.17 ± 0.01 ^b	0.25 ± 0.02 ^b
半熟粉热水面团	1 187.86 ± 68.64 ^{ab}	0.22 ± 0.02 ^a	0.28 ± 0.01 ^a
熟粉凉水面团	1 329.67 ± 127.96 ^a	0.20 ± 0.01 ^{ab}	0.29 ± 0.01 ^a
熟粉热水面团	1 311.39 ± 4.44 ^a	0.21 ± 0.01 ^a	0.30 ± 0.01 ^a

注:同一列不同字母代表差异显著($P<0.05$)。

3 结论

炒制对燕麦粉理化特性及对面团的风味和形成特性有较大影响。炒制处理后燕麦粉直链淀粉

含量升高;燕麦粉的糊化焓与峰值温度明显下降,淀粉双螺旋结构遭到破坏,对燕麦粉面团加工的黏弹性能有所提高。

红外光谱分析表明,经过不同程度的炒制,燕麦粉淀粉的晶型结构并未改变。熟制燕麦粉风味更加突出。炒制程度及和面水温对于燕麦面团的硬度和黏弹性影响较大,热水和面燕麦淀粉糊化程度增大,面团易形成。炒熟的燕麦粉加工性能最优,面团风味最佳。

参 考 文 献

- [1] 陈刚,文婷,张萍,等.皮裸燕麦胚乳淀粉形态结构及理化性质的比较[J].麦类作物学报,2022,42(1):81-89.
CHEN G, WEN T, ZHANG P, et al. Comparison of morphological structure and physicochemical properties of starch from four oat varieties[J]. Journal of Triticeae Crops, 2022, 42(1): 81-89.
- [2] 袁哲.燕麦蛋白-果胶互作机制及其复合物乳化性研究[D].天津:天津科技大学,2021.
YUAN Z. Study on interaction mechanism of oat protein-pectin and emulsification of its complex [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2021.
- [3] LIAO M Y, SHEN Y C, CHIU H F, et al. Down-regulation of partial substitution for staple food by oat noodles on blood lipid levels: A randomized, double-blind, clinical trial[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2019, 27(1): 93-100.
- [4] BROECK H V D, LONDONO D, TIMME R R. Profiling of nutritional and health-related compounds in oat varieties[J]. Foods, 2016, 5(1): 1-11.
- [5] 徐托明.燕麦茶的研发及其风味物质的评价研究[D].武汉:华中农业大学,2010.
XU T M. Study on the exploitation of oat tea and evaluation of its flavor substances[D]. Wuhan: Huazhong Agriculture University, 2010.
- [6] 曹汝鸽,林钦,任长忠,等.不同灭酶处理对燕麦气味和品质的影响[J].农业工程学报,2010,26(12):378-382.
CAO R G, LIN Q, REN C Z, et al. Effects of different inactivation treatment on oat flavor and quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(12): 378-382.
- [7] 王佩瑶,张美莉.炒制对燕麦粉营养及加工特性的影响[J].食品科技,2022,47(10):191-196.
WANG P Y, ZHANG M L. Effects of roasting on nutrition and processing characteristics of oat powder [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(10): 191-196.
- [8] 裘实,卫平洋,魏海燕,等.穗发芽程度对粳稻稻米品质和蛋白质组分的影响[J].江苏农业学报,2019,35(3):523-530.
QIU S, WEI P Y, WEI H Y, et al. Effect of pre-harvest sprouting on quality and protein components of Japonica rice[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(3): 523-530.
- [9] 李海燕.基于近红外光谱技术的食品安全检测及其风险评估[J].中国食品,2022(14):103-105.
LI H Y. Food safety detection and its risk evaluation based on near-infrared spectroscopic techniques [J]. China Food, 2022(14): 103-105.
- [10] 张晶,张美莉.燕麦淀粉提取工艺优化及其相关性研究[J].食品科技,2019,44(9):295-302.
ZHANG J, ZHANG M L. Extraction and related properties of oat starch[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(9): 295-302.
- [11] 张晶.超高压处理对燕麦淀粉/ β -葡聚糖复配体系的影响及抑制淀粉老化机制的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
ZHANG J. Study on the effects of ultra-high pressure treatment on oat starch/ β -glucan compound system and mechanism of inhibiting retrogradation of starch[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [12] 刘建林,孙学颖,张晓蓉,等.GC-MS结合电子鼻/电子舌分析发酵羊肉干的风味成分[J].中国食品学报,2021,21(5):348-354.
LIU J L, SUN X Y, ZHANG X R, et al. Analysis of flavor components of fermented mutton jerky by GC-MS combined with electronic nose/ electronic tongue[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(5): 348-354.
- [13] 王燕,易翠平,王强,等.不同裸燕麦品种的淀粉特性[J].麦类作物学报,2010,30(3):560-563.
WANG Y, YI C P, WANG Q, et al. Characterization of starch from different naked oat varieties[J]. Journal of Triticeae Crops, 2010, 30(3): 560-563.
- [14] 史韬琦,张晨,丁文平,等.不同品种籼米直链淀粉含量对米线加工特性和品质的影响[J].食品工业科技,2020,41(19):33-38.
SHI T Q, ZHANG C, DING W P, et al. Effect of amylose content of different varieties of long rices

- on processing characteristics and quality of rice noodle[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(19): 33-38.
- [15] 董锐, 贺婷, 胡新中, 等. 不同炒制时间对燕麦粉理化特性及货架期的影响[J/OL]. *中国粮油学报*: 1-9 (2022-08-22)[2022-08-27]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000002>.
- DONG Y, HE T, HU X Z, et al. Effect of different stir-frying time on the physical and chemical properties and shelf life of oat flour[J/OL]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*: 1-9 (2022-08-22)[2022-08-27]. <https://doi.org/10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000002>.
- [16] GUNARATNE A, HOOVER R. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of tuber and root starches[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2002, 49(4): 425-437.
- [17] 郑学玲, 张玉玉, 张杰. 青稞淀粉理化特性的研究[J]. *中国粮油学报*, 2011, 26(4): 30-36.
- ZHENG X L, ZHANG Y Y, ZHANG J, et al. Study on physicochemical properties of hull-less barley starch[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2011, 26(4): 30-36.
- [18] 魏益民, 任嘉嘉, 张波, 等. 高温处理燕麦籽粒对面粉黏度特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(5): 299-302.
- WEI Y M, REN J J, ZHANG B, et al. Effects of high-temperature heat treatment of oat kernel on viscosity properties of oat flour[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(5): 299-302.
- [19] 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. Effect of high hydrostatic pressure treatment on morphological, thermal and rheological properties of oat starch[J]. *Food Science*, 2020, 41(23): 114-121.
- [20] XU M, JIN Z, SIMSEK S, et al. Effect of germination on the chemical composition, thermal, pasting, and moisture sorption properties of flours from chickpea, lentil and yellow pea[J]. *Food Chemistry*, 2019, 295: 579-587.
- [21] 闫希瑜, 李小平, 刘柳, 等. 制粉方式对燕麦粉理化及面团特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(4): 13-19.
- YAN X Y, LI X P, LIU L, et al. Effects of milling on the physicochemical properties and dough characteristics of oat flours[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(4): 13-19.
- [22] LI W W, LI C M, GU Z B, et al. Relationship between structure and retrogradation properties of corn starch treated with 1,4- α -glucan branching enzyme[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 868-875.
- [23] 孙若琪, 王丽丽, 李孟佳, 等. 不同灭酶处理对青稞粉理化特性的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(2): 9-15, 22.
- SUN R Q, WANG L L, LI M J, et al. Effects of different enzyme killing treatments on physicochemical properties of highland barley powder[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 43(2): 9-15, 22.
- [24] BAJER D, KACZMAREK H, BAJER K. The structure and properties of different type of starch exposed to UV radiation: A comparative study[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2013, 98(1): 477-482.
- [25] 贺婷. 三种处理方式对燕麦理化特性及微生物的影响[D]. 西安: 陕西师范大学, 2021.
- HE T. Effects of three treatments on physicochemical properties and microorganisms of oats[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2021.
- [26] OVANDO-MARTINEZ M, WHITNEY K, REUHS B L, et al. Effect of hydrothermal treatment on physicochemical and digestibility properties of oat starch[J]. *Food Research International*, 2013, 52(1): 17-25.
- [27] 王海林, 施源德, 谢婉研, 等. 酶解改性对燕麦粉中淀粉含量及消化性的影响[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(2): 87-92.
- WANG H L, SHI Y D, XIE W Y, et al. Effect of enzymatic modification on starch content and digestibility of oat flour[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(2): 87-92.
- [28] 刘楚海. 酵母抽提物对低糖枸杞复合饮料特性影响研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022.
- LIU C H. Study on the effect of yeast extract on the properties of low-sugar wolfberry compound beverage[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.
- [29] 张焱, 张文刚, 党斌, 等. 炒制青稞及燕麦香气组成差异研究[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(5): 43-51.

- ZHANG Y, ZHANG W G, DANG B, et al. Aroma composition different of roasted highland barley and oats[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(5): 43-51.
- [30] DACH A, SCHIEBERLE P. Changes in the concentrations of key aroma compounds in oat (*Avena sativa*) flour during manufacturing of oat pastry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(5): 1589-1597.
- [31] BAI X, ZHANG M L, ZHANG Y K, et al. Effects of pretreatment on the volatile composition, amino acid, and fatty acid content of oat bran[J]. Foods, 2022, 11(19): 3070.
- [32] ABDEL-HALEEM A M H. Influence of heat treatment for some wheat milling fractions on Fino bread quality[J]. J Food Sci Technol, 2019, 56(5): 2639-2650.
- [33] 孟会玲. 烫面面团品质特性及烫面蒸饼制作工艺研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- MENG H L. Studies on the quality characteristics of hot water dough and the processing technology of Chinese steamed spring -rolls[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.
- [34] 李雪琴, 黄亚飞, 苗笑亮, 等. 烫面蒸饼制作工艺及品质特性研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 78-81, 112.
- LI X Q, HUANG Y F, MIAO X L, et al. The production process and quality characteristics of Chinese steamed spring-rolls[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 78-81, 112.
- [35] 汪磊. 燕麦 β -葡聚糖对面粉、面团特性及馒头品质的影响和机制[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- WANG L. Effect and mechanism of oat β -glucan incorporation on the quality of flour, dough and steamed bread[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [36] 李娜, 陈前, 李海峰, 等. 燕麦粉对小麦面团特性及饼干品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(1): 134-140.
- LI N, CHEN Q, LI H F, et al. Influence of oat flour on dough properties and biscuit quality[J]. Food Research and Development, 2021, 42(1): 134-140.

Effect of Stir-frying on the Flavor Characteristics of Oat Flour and Dough Formation

Wang Peiyao, Zhang Meili*

(College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract The effect of frying on the flavor characteristics and dough properties of oat flour was studied. Oat flour was categorized into raw oat flour, semi-cooked oat flour and cooked oat flour according to the degree of frying. The flavor components were determined by electronic nose, and principal component analysis was used to comprehensively determine the flavor characteristics of oat doughs with different treatments, and to study the physicochemical properties of oat doughs under different frying degrees and temperatures of dough water. The results showed that the content of straight-chain starch of oat flour increased significantly ($P<0.05$) with the increase of frying degree, and the solubility and swelling degree showed a tendency of increasing and then decreasing with the prolongation of time; the onset temperature of oat flour after frying was reduced to 60.07 °C, and the peak temperature and enthalpy value decreased gradually, and frying did not change the crystalline structure of the oat starch. Scanning electron micrographs showed more depressions on the surface of starch granules of cooked oat flour, and the dough cohesion increased with the increase of the temperature of the mixing water. Aldehydes and alkane aromatic components increased significantly in the fried samples and in the doughs prepared with hot water at 100 °C. The results showed that the doughs were more aromatic than the fried samples, and the aldehydes and alkanes increased significantly in the fried samples. The study showed that the fried oat flour had the best processing performance, the best dough flavor and the best dough physicochemical properties.

Keywords oats; degree of stir-frying; physical and chemical properties; flavor characteristics; dough characteristics