

不同粉碎方法对全麦粉品质的影响

邓 翀, 胡秀婷, 罗舜菁, 刘成梅*
(南昌大学食品学院, 江西 南昌 330031)

摘 要: 为研究不同粉碎设备对全麦粉品质的影响, 采用直接粉碎法(锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨)和回添法(肖邦公司生产的磨粉机)将小麦粉碎制得4种平均粒径相近的全麦粉, 分析麸皮粒径、全麦粉的基本营养成分、酚类含量、淀粉损伤含量、糊化性质以及全麦面团的流变学特性。结果表明, 回添法对麸皮的破碎程度低于直接粉碎法, 在3种直接粉碎法中低温冲击磨制备全麦粉的麸皮粒径最小, 为118.00 μm ; 低温冲击磨制备全麦粉的可溶性膳食纤维相对含量以及游离多酚含量分别为2.22%和48.11 mg/100 g, 显著高于其他3种制粉方式; 回添法制备全麦粉的损伤淀粉相对含量为3.85%, 显著低于直接粉碎法, 且糊化特性以及全麦面团的黏弹性最好。本研究结果可为高品质全麦粉的制备与应用提供理论基础。

关键词: 制粉工艺; 全麦粉; 损伤淀粉; 糊化特性; 流变特性

Effects of Different Milling Methods on the Quality of Whole Wheat Flour

DENG Chong, HU Xiuting, LUO Shunjing, LIU Chengmei*
(College of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: To investigate the effect of milling equipment on the quality of whole wheat flour, four whole wheat flours with similar average particle sizes were obtained by direct crushing methods (hammer cyclone mill, gear mill, and low-temperature impact mill) and back addition method (Chopin mill), and their nutritional compositions, polyphenol contents, damaged starch contents, and gelatinization properties were evaluated. The particle size distribution of the resulting brans and the rheological properties of dough made from each of the four whole wheat flours were analyzed. The results showed that back addition had less damaging effect on bran than direct crushing. Among the three direct crushing methods, the particle size of bran ground by low-temperature impact mill was the smallest (118.00 μm). The soluble dietary fiber and free polyphenol contents of whole wheat flour ground by low-temperature impact mill were 2.22% and 48.11 mg/100 g, respectively, which were significantly higher than those of all three other flours. The relative content of damaged starch in whole wheat flour prepared by the back addition method was 3.85%, which was significantly lower than that of the direct crushing methods. Moreover, the former had better gelatinization properties and viscoelasticity. The results of this study provide a theoretical basis for the preparation and application of high-quality whole wheat flour.

Keywords: milling technology; whole wheat flour; damaged starch; gelatinization properties; rheological properties

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240807-061

中图分类号: TS213.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2025) 03-0196-08

引文格式:

邓翀, 胡秀婷, 罗舜菁, 等. 不同粉碎方法对全麦粉品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 196-203. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240807-061. <http://www.spkx.net.cn>

DENG Chong, HU Xiuting, LUO Shunjing, et al. Effects of different milling methods on the quality of whole wheat flour[J]. Food Science, 2025, 46(3): 196-203. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20240807-061. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2024-08-07

基金项目: 国家自然科学基金联合重点项目(U22A20537); 江西省重点研发计划项目(20232BBF60023)

第一作者简介: 邓翀(2000—)(ORCID: 0009-0008-9000-713X), 女, 硕士研究生, 研究方向为谷物加工。

E-mail: 976843769@qq.com

*通信作者简介: 刘成梅(1963—)(ORCID: 0000-0002-9649-5313), 男, 教授, 博士, 研究方向为粮食加工。

E-mail: liuchengmei@ncu.edu.cn

全谷物食品是指在加工过程中保留了谷物原始结构中的主要部分——胚、胚乳和种皮的食物。因保留了谷物的麸皮层，全谷物食品含有丰富的膳食纤维和多酚等生物活性物质^[1]。研究发现，摄入足够的全谷物可降低患心血管疾病和2型糖尿病等慢性病的发病率^[2]。全麦食品是目前研究较多且在市场上常见的全谷物食品。全麦粉品质是影响全麦食品品质的关键，但麸皮的存在导致全麦食品的食用品质较差^[3]。因此，选择合适的制粉方式制备品质优良的全麦粉对于改善全麦食品的适口性尤为重要。

全麦粉的制备工艺主要分为两种：一种是直接粉碎法，即将完整的小麦粒直接粉碎得到全麦粉；另一种是回添法，即将麸皮与胚乳分离并分别对其进行粉碎，将磨碎的麸皮和胚乳按其在全麦中的自然比例混合得到全麦粉^[4]。目前研究普遍认为相比于直接粉碎法，回添法可对麸皮单独粉碎，有利于减少对全麦粉中淀粉和蛋白质的损伤，保留更多的热敏性营养成分如多酚，同时可对麸皮进行稳定化处理，以降低麸皮的脂肪酶活力，从而提高全麦粉的贮藏稳定性和全麦产品的感官品质。辊磨是目前被广泛应用于回添法制备全麦粉的一种研磨设备，也是传统用于制备小麦粉的设备。其可分离胚乳和麸皮，并将胚乳粉碎得到精制小麦粉，再利用其他设备对麸皮单独粉碎，按出粉比例回添后得到全麦粉。用于直接粉碎法的粉碎设备则不具备分离胚乳和麸皮的能力，一般不专门用于粉碎小麦，常见的研磨设备包括锤磨、齿轮磨、冲击磨。作为冲击式粉碎设备，锤磨通常配有一个安装在圆柱形腔室内的旋转锤（图1A），通过高速旋转的锤头将物料粉碎，具有粉碎效率较高、适合工业化、大规模生产的特点^[5]。但由于金属表面带来较强的剪切力及加工过程中的高温环境，锤磨制粉会导致淀粉颗粒的损伤^[6]。齿轮磨由磨辊及其外圆柱表面均匀分布的共轭齿面组成的两个齿轮磨辊构成（图1B），通过两磨辊齿面对物料挤压、研磨对物料进行粉碎^[7]。其部件更换方便、设备维修简便、成本低，然而在制粉过程中存在物料较严重的黏附现象，导致其出粉率较低。本实验室开发了一款低温冲击磨，由粉碎腔、分级腔、冷风机等关键部分组成（图1C），通过将物料与衬板齿撞击及在锤头与衬板的齿面间剪切冲击进行粉碎，并配备冷风机，在粉碎过程中可控制粉碎腔温度在20℃以下，粉碎后的物料由分级腔内的旋转气流场进行分级，从而克服了传统粉碎设备产量低、能耗高、不适合加工热敏性物料的问题，减小了粉碎过程中的机械损伤和热损伤^[8]。本课题组前期将低温冲击磨用于糙米和紫玉米的粉碎，结果发现，低温冲击磨制备的粉体粒径均匀，同时能够有效粉碎富含膳食纤维的谷物麸皮并保留更多的热敏性物质^[8-9]。然而，小麦籽粒的营养组成和理化性质与糙米和

紫玉米不同，低温冲击磨对小麦的粉碎效果及粉体性能的影响尚不明确。

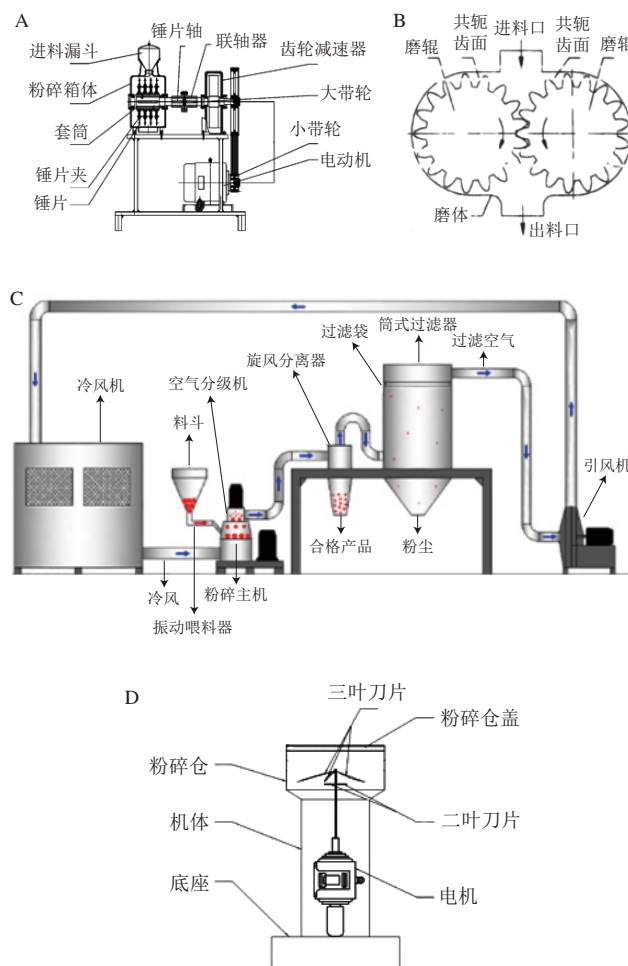


图1 锤式旋风磨（A）、齿轮粉碎机（B）、低温冲击磨（C）、万能粉碎机（D）结构示意图^[7,9-10]

Fig. 1 Structure diagrams of hammer mill (A), gear mill (B), low-temperature impact mill (C), and universal crusher (D)^[7,9-10]

因此，本实验采用上述3种直接粉碎设备（锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨）和回添法制备平均粒径相近的全麦粉，研究不同粉碎设备对全麦粉理化性质的影响，以期选用能够制备高品质全麦粉的设备提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小麦（‘轮选103’）由当地农户提供，种植年份为2022年，水分质量分数为10.68%。

福林-酚试剂 北京索莱宝科技有限公司；没食子酸美国Sigma公司；总淀粉试剂盒、总膳食纤维试剂盒、淀粉损伤试剂盒 爱尔兰Megazyme公司。

1.2 仪器与设备

9FQ50-40锤式旋风磨 江西红星机械厂; STWS-20齿轮粉碎机 江苏盛田机械制造有限公司; LNI 66A低温冲击磨 北京协同创新研究院; CD1实验磨粉机 法国肖邦技术公司; HR-10万能粉碎机 上海哈瑞斯电器有限公司; Mastersizer 3000粒度分析仪 英国Malvern仪器有限公司; TCS SP8共聚焦激光扫描显微镜 德国Leica Microsystems GmbH公司; TU-1810分光光度计 北京普析通用仪器有限责任公司; Tec Master快速粘度分析仪 澳大利亚Newport Scientific公司; MCR 302流变仪 奥地利Anton Paar公司。

1.3 方法

1.3.1 全麦粉的制备

1.3.1.1 采用锤式旋风磨制备全麦粉

用锤式旋风磨将小麦粉碎至全麦粉平均粒径为110 μm , 获得的全麦粉命名为锤式旋风磨全麦粉。

1.3.1.2 采用齿轮粉碎机制备全麦粉

用齿轮粉碎机将小麦粉碎至全麦粉平均粒径为110 μm , 获得的全麦粉命名为齿轮粉碎机全麦粉。

1.3.1.3 采用低温冲击磨制备全麦粉

用低温冲击磨粉碎小麦粉碎至全麦粉平均粒径为110 μm , 磨盘和空气分级机的转速分别设置为2 160 r/min和1 200 r/min。粉碎腔的温度由冷风机和引风机控制, 保持在16.7~17.0 $^{\circ}\text{C}$ 。全麦粉从旋风分离器的出口处收集, 并且命名为低温冲击磨全麦粉。

1.3.1.4 采用肖邦磨制备全麦粉

肖邦公司生产的磨粉机和万能粉碎机以下简称为“肖邦磨”, 采用肖邦磨处理小麦, 分别收集皮磨面粉、心磨面粉、粗麸及细麸, 回收的麸皮经万能粉碎机粉碎4次(粉碎1 min、暂停1 min记为1次)后按出粉率的比例回添, 获得平均粒径约为110 μm 的全麦粉, 并命名为肖邦磨全麦粉。

将以上获得的全麦粉用自封袋包装后放在-20 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中储藏。

1.3.2 粒径分析

1.3.2.1 全麦粉的粒径分析

采用Mastersizer 3000粒度分析仪测定全麦粉的粒径^[9]。即将全麦粉分散于蒸馏水中, 充分搅拌使得全麦粉分散均匀。在测量时, 设置粒子的折射率为1.53、遮光率为10%~20%。测定累积频率为10%、50%、90%和平均体积对应全麦粉的粒径, 分别命名为 d_{10} 、 d_{50} 、 d_{90} 和 $d_{4,3}$, 并按下式计算全麦粉粒径的跨度系数(Span):

$$\text{Span} = \frac{d_{90} - d_{10}}{d_{50}}$$

1.3.2.2 全麦粉中麸皮的粒径测定

全麦粉由小麦粉和麸皮组成, 通过一系列的酶(高温 α -淀粉酶、蛋白酶和淀粉葡萄糖苷酶)水解除去组成小

麦粉的淀粉和蛋白质, 得到全麦粉中的麸皮并测定其粒径^[9]。简而言之, 将全麦粉(1.00 g)与Mes-Tris缓冲溶液(pH 8.2, 40 mL)混合, 并向其中加入高温 α -淀粉酶溶液(500 U)。在98 $^{\circ}\text{C}$ 条件下水解30 min。随后, 将混合物冷却至60 $^{\circ}\text{C}$, 然后加入蛋白酶溶液(35 U), 于60 $^{\circ}\text{C}$ 条件下水解30 min, 加入HCl溶液将pH值调节至4.1~4.8。最后, 加入淀粉葡萄糖苷酶溶液(660 U), 并在60 $^{\circ}\text{C}$ 继续水解30 min, 得到麸皮。最后, 采用1.3.2.1节描述的方法测定麸皮的粒径。

1.3.3 全麦粉中麸皮的微观结构

用超纯水对麸皮进行分散, 然后用0.1%质量分数荧光增白剂对麸皮染色, 在黑暗环境下静置1 h后用超纯水洗涤3次。制片后使用共聚焦激光扫描显微镜观察微观形貌, 激发波长为405 nm^[11]。

1.3.4 全麦粉的化学成分组成测定

按照GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》方法测定全麦粉的水分含量; 按照GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》方法测定全麦粉的蛋白质含量(蛋白质折算系数5.83); 按照GB/T 1477—2008《食品中粗脂肪的测定》方法测定全麦粉的脂肪含量; 按照GB 5009.4—2016《食品中灰分的测定》方法测定全麦粉的灰分含量; 按照GB 5009.88—2023《食品中膳食纤维的测定》方法测定全麦粉的可溶性膳食纤维含量; 采用损伤淀粉试剂盒测定损伤淀粉的含量。

1.3.5 酚类物质含量的测定

参考Zeng Zicong等^[12]的方法测定全麦粉中酚类物质的含量。将全麦粉(3.00 g)加入20 mL 70%乙醇溶液中, 搅拌30 min, 随后5 000 r/min离心5 min。重复提取两次, 合并上清液。上清液在45 $^{\circ}\text{C}$ 旋转蒸发, 用体积分数50%的甲醇溶液重新溶解, 提取液进一步用于游离多酚含量的测定。将250 μL 提取液与1.0 mL蒸馏水混合后, 加入250 μL 福林-酚试剂反应6 min。随后加入2.5 mL 7% Na_2CO_3 溶液, 加蒸馏水定容至10 mL。混合物在室温条件下反应90 min后, 在760 nm波长处测定其吸光度。用没食子酸溶液标准曲线方程计算游离多酚含量, 结果表示为mg/100 g。

由于全麦粉中多酚可发荧光, 使用激光共聚焦显微镜观察全麦粉中的多酚分布, 激发波长为488 nm。

1.3.6 全麦粉糊化特性的测定

通过快速黏度分析仪测定全麦粉的糊化特性^[13]。将3.5 g全麦粉置于快速黏度分析仪铝罐中, 加入25.0 mL蒸馏水。将悬浮液在50 $^{\circ}\text{C}$ 条件下保持60 s后, 在220 s内加热到95 $^{\circ}\text{C}$, 保持160 s。最后在220 s内冷却至50 $^{\circ}\text{C}$, 并保持120 s。测试过程中记录样品的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度、崩解值和回升值。

1.3.7 全麦面团流变特性的测定

将全麦粉和蒸馏水按质量比2:1混合均匀并充分搅拌制得全麦面团,使用流变仪对全麦面团进行分析。将5.0 g面团放置在固定板的中心,采用50 mm直径的平板(平板转子的型号PP 50),设置间距为3 mm。首先,以1.0 Hz的频率对全麦面团进行应变扫描,以确定线性弹性区域。接着,选择线性黏弹区范围内合适的应变值后,在0.1~10 Hz的频率范围内,测定全麦面团的储能模量(G')、损耗模量(G'')和损耗因子($\tan \delta$)。

1.4 数据统计与分析

结果表示为每个样本3次重复分析的 $\bar{x} \pm s$ 。使用Origin 9.0软件和SPSS 24.0软件进行数据分析。使用单因素方差分析(One-way ANOVA)在5%显著水平下进行Tukey检验对均值进行比较。

2 结果与分析

2.1 全麦粉的粒径分析

为了探究不同制粉工艺对全麦粉营养成分和理化性质的影响,将3种直接粉碎法(锤式旋风磨、齿轮粉碎机和低温冲击磨)与1种回添法(肖邦磨)制备的全麦粉进行了对比,用上述4种粉碎方式制备了平均粒径相近的全麦粉($d_{4.3} \approx 110 \mu\text{m}$)。在平均粒径相近的情况下,这4种全麦粉具有不同的粒径分布。如图2所示,锤式旋风磨呈现出多峰分布模式,齿轮粉碎机、低温冲击磨和肖邦磨均呈现出双峰分布模式,Span分别为4.93、2.37、2.58和3.01。这表明相较于其他两种粉碎方式,齿轮粉碎机和低温冲击磨制备的全麦粉粒度分布更加均匀。低温冲击磨在对物料进行粉碎时,撞击、冲击和剪切等多种力共同作用,粉碎腔内不同粒径的颗粒受到的主要作用力不同:粗颗粒受到的主要作用力为剪切力,随着粒径的逐渐下降其比表面能高,颗粒的裂纹与缺陷减少,粉碎颗粒所需要的能量更高,破碎颗粒的主要作用力逐渐变为冲击^[8]。相较于锤式旋风磨单一的冲击力和万能粉碎机单一的剪切力,多种作用力的协同作用以及高效分级机的存在避免了过度粉碎是低温冲击磨制粉粒径分布均一的原因。另外,在低温条件下小麦种子的脆度提高,这也使得它们容易破碎成细小且一致的尺寸。不同于上述3种磨粉机的作用力,齿轮粉碎机是通过齿面的挤压、研磨对物料进行粉碎,作用力种类的不同可能是导致其制粉粒径分布均一的原因。

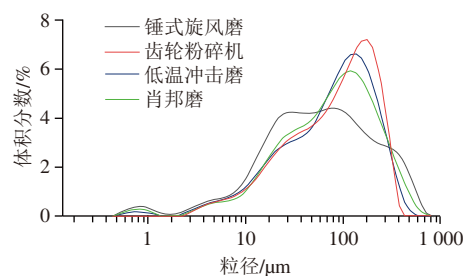


图2 不同方法碾磨全麦粉的粒径分布

Fig. 2 Particle size distributions of whole wheat flour milled by different methods

2.2 麸皮的粒径分析与微观结构

进一步测定4种全麦粉中麸皮的粒径,发现锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨制备的麸皮呈现出单峰的分布模式,肖邦磨制备的麸皮呈现出双峰的分布模式(图3)。此外,锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨和肖邦磨制备的麸皮平均粒径分别为133.67、150.00、118.00 μm 和204.00 μm 。即4种全麦粉中麸皮粒径排序如下:低温冲击磨制备麸皮<锤式旋风磨制备麸皮<齿轮粉碎机制备麸皮<肖邦磨制备麸皮。这表明低温冲击磨可有效地粉碎小麦粒中的麸皮,而万能粉碎机则不易对麸皮进行粉碎。一般认为,颗粒粉碎机制主要有3种:剪切、冲击和挤压粉碎^[8]。当颗粒发生剪切粉碎时,产物由接近母颗粒大小的颗粒和少量从母颗粒表面剥落的细小颗粒组成;当颗粒发生挤压粉碎时,粉碎产物是一些母颗粒50%~80%体积大小的颗粒;冲击粉碎则是对颗粒快速施加强应力,粉碎产物是一些母颗粒20%~70%体积大小的颗粒。由此可见,对于难以粉碎的麸皮,以剪切作用力为主的万能粉碎机的粉碎能力低于以挤压作用力为主的齿轮粉碎机和以冲击作用力为主的锤式旋风磨。而综合撞击、冲击和剪切等多种力共同作用的低温冲击磨则具有最强的粉碎能力。有研究报道,麸皮的加入会导致面筋蛋白被稀释,交联作用减弱,影响面筋网络的形成,进而对含麸面制品的质量产生不利影响^[14-15]。为了减小麸皮加入造成的劣化作用,目前普遍采用的方法是降低麸皮粒径^[16]。由此推测,低温冲击磨制备全麦粉的麸皮对面筋网络的破坏较小,有利于面制品的加工。

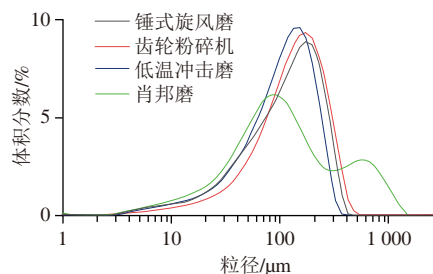


图3 麸皮的粒径分布

Fig. 3 Particle size distribution of wheat bran

如图4所示，在锤式旋风磨、齿轮粉碎机和肖邦磨制备的全麦粉中，含有大块的、具有完整细胞壁结构的麦麸，而在低温冲击磨制备的全麦粉中未观察到完整的细胞壁结构。这表明相较于其他3种粉碎方式，低温冲击磨可将小麦麸皮粉碎得更细碎。该结果与全麦粉中麸皮的粒径结果相印证。

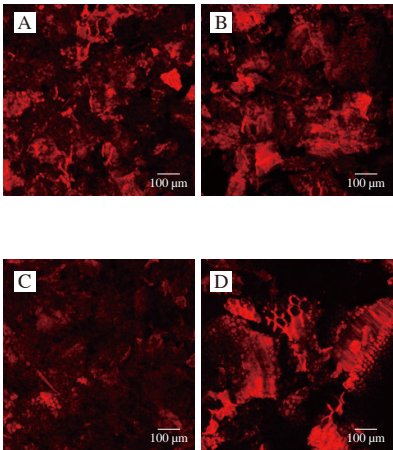


图4 锤式旋风磨(A)、齿轮粉碎机(B)、低温冲击磨(C)和肖邦磨(D)制备麦麸的微观形貌
Fig. 4 Microstructure of wheat bran milled by hammer mill (A), gear mill (B), low-temperature impact mill (C) or Chopin mill (D)

2.3 全麦粉的组成成分分析

2.3.1 基本营养成分

如表1所示，全麦粉的基本营养成分包括淀粉、蛋白质、脂肪、灰分和可溶性膳食纤维。不同制粉工艺生产全麦粉的淀粉和蛋白质含量没有显著差异，这是由于粉碎后全麦粉被完全收集。灰分含量反映了小麦籽粒中矿物质的存在，理论上各组全麦粉中灰分含量应相同。然而，4种粉碎方式制得的全麦粉中灰分含量具有显著差异，这可能是由于脂肪等组分含量差异导致。锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨、肖邦磨制备的全麦粉中脂肪的相对含量分别为1.14%、1.12%、1.10%、1.05%。即肖邦磨制备全麦粉的脂肪含量相较于另外3种制粉方式更低，这可能是由于肖邦磨的内部结构复杂，且麸皮粉碎要经过肖邦磨和万能粉碎机两个设备，导致脂肪黏壁损失更大。锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨、肖邦磨制备的全麦粉中可溶性膳食纤维相对含量分别为1.97%、1.99%、2.22%、1.92%。其中低温冲击磨制备全麦粉的可溶性膳食纤维显著高于其他3种制粉方式。这可能是由于低温冲击磨对麦麸组分的粉碎程度较高，破坏了木质素和半纤维素之间的分子间相互作用，导致不溶性纤维转化为可溶性纤维。

表1 不同方法碾磨的全麦粉营养组成
Table 1 Nutritional compositions of whole wheat flour milled by different methods

组别	总淀粉 相对含量/%	蛋白质 相对含量/%	灰分 相对含量/%	脂肪 相对含量/%	可溶性膳食纤维 相对含量/%	损伤淀粉 相对含量/%	游离多酚含量/ (mg/100 g)
锤式旋风磨	71.68±2.09 ^a	13.63±0.14 ^a	1.41±0.03 ^a	1.14±0.05 ^a	1.97±0.06 ^a	4.73±0.12 ^a	43.23±2.44 ^a
齿轮粉碎机	72.32±2.68 ^a	13.87±0.31 ^a	1.21±0.00 ^{bc}	1.12±0.05 ^a	1.99±0.10 ^b	4.71±0.14 ^a	39.71±2.27 ^{bc}
低温冲击磨	71.96±3.63 ^a	13.84±0.04 ^a	1.25±0.01 ^b	1.10±0.00 ^{ab}	2.22±0.09 ^a	4.31±0.11 ^b	48.11±0.26 ^a
肖邦磨	72.32±2.51 ^a	13.72±0.26 ^a	1.17±0.04 ^c	1.05±0.03 ^b	1.92±0.06 ^b	3.85±0.03 ^c	35.84±0.28 ^c

注：同列字母不同表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

2.3.2 损伤淀粉含量

淀粉是全麦粉中重要的成分。研究报道不同研磨过程中的机械力和温度会对淀粉颗粒产生不同程度的损伤，从而影响面制品的加工性能^[17-18]。已有研究表明，淀粉损伤会导致面条品质劣化，如色泽加深、黏度增加、蒸煮损失率增加、适口性变差^[19-20]。因此，应尽可能减少制粉过程中的淀粉损伤。如表1所示，锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨、肖邦磨制备的全麦粉中损伤淀粉的相对含量分别为4.73%、4.71%、4.31%、3.85%。其中肖邦磨制备全麦粉的损伤淀粉含量最低，这是因为肖邦磨将胚乳和麸皮分离后分别对其进行粉碎，从而避免了对胚乳的过度粉碎，降低了淀粉的机械损伤。这也是回添法制备全麦粉的优势。而直接粉碎法是将整粒小麦直接研磨制成全麦粉，制粉工艺相对简单，但整粒粒研磨困难、分级难度大，导致损伤淀粉含量高。在3种直接粉碎法中，低温冲击磨制备全麦粉的损伤淀粉含量最低。这是由于低温冲击磨粉碎系统配有冷风控温系统，减少了淀粉的热损伤，且低温提高了小麦颗粒的脆性，降低了破坏谷粒结构和减小面粉粒度所需的机械能，从而减少了研磨期间淀粉分子结构的机械降解。同时低温冲击磨还配备了高效分级机，可及时分离粒径小的胚乳粉，避免过度粉碎造成的淀粉机械损伤。另有研究表明，锤式粉碎机通过高速旋转将谷物压在研磨环上以破坏谷物结构，具有破坏性更大的冲击能量，从而导致较严重的淀粉损伤^[21]。但目前还没有关于齿轮粉碎机对淀粉损伤影响的研究。根据不同粉碎设备制备全麦粉中损伤淀粉的含量，推测作用力类型的不同所导致冲击能量的不同也可能是造成淀粉损伤较高的原因之一。

2.3.3 酚类含量

如表1所示，锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨、肖邦磨制备的全麦粉中游离多酚的含量分别为43.23、39.71、48.11、35.84 mg/100 g。即在所有样品中，低温冲击磨制备全麦粉的游离多酚含量显著高于其他3种制粉方式。这可能是由于低温冲击磨制备的全麦粉中麸皮粒径最小，从而有利于麸皮释放出更多的多酚。同时，低温冲击磨粉碎系统配有冷风控温系统，减少了机械力所产生热量造成的多酚损失。此外，还配备了高效分级机，可避免过度粉碎麸皮造成多酚的降解。而肖

邦磨制备的全麦粉中游离多酚含量显著低于其他3种制粉方式。这是由于万能粉碎机对麦麸的粉碎程度低,肖邦磨制备麦麸的粒径显著高于其他磨粉方式制备麸皮的粒径,为204.00 μm 。与胚乳相比,麸皮是酚类化合物的集中来源,研究表明,游离多酚含量随麸皮粒径的减小显著增加^[22-23]。因此,肖邦磨制备全麦粉的游离多酚释放量显著低于其他3种方式制备的全麦粉。另有研究表明,研磨引起的热效应可导致多酚氧化,从而降低谷物中多酚的含量^[24]。由于肖邦磨制粉是分别对胚乳和麸皮进行粉碎,多酚缺失小麦淀粉和蛋白质的保护作用,且万能粉碎机没有配备冷风机,粉碎腔温度较高,多酚受到的热效应和机械效应更剧烈,从而造成损失。因此,游离多酚释放量少,强烈的热效应和机械效应造成游离多酚损失程度高,导致肖邦磨制备全麦粉的游离多酚含量显著低于其他组全麦粉。据报道,麸皮中酚类具有自发荧光的特性^[25]。因此,本研究还采用激光共聚焦显微镜观察自发荧光强度并近似表征全麦粉中酚类物质的含量。如图5所示,低温冲击磨制备的全麦粉中荧光最强,表明其酚类物质含量最高,进一步证明了低温冲击磨在保护酚类物质上的优势。

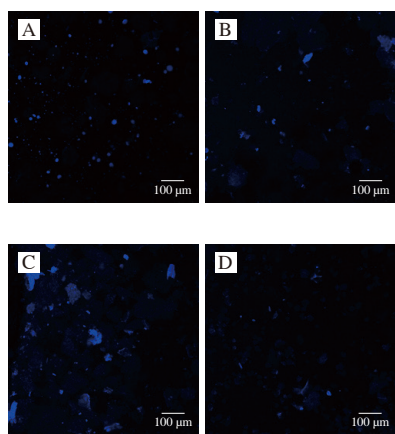


图5 锤式旋风磨(A)、齿轮粉碎机(B)、低温冲击磨(C)和肖邦磨(D)制备全麦粉的多酚分布

Fig. 5 Polyphenol distribution of whole wheat flour milled by hammer mill (A), gear mill (B), low-temperature impact mill (C) or Chopin mill (D)

2.4 全麦粉的糊化特性分析

糊化特性是反映淀粉品质的重要指标,与小麦制品产品质量密切相关^[26]。不同制粉方式对全麦粉的损伤淀粉含量和麸皮粒度分布等产生影响,从而改变小麦粉的糊化特性。研究表明,峰值黏度高的面粉加工出的面包体积更大、质地柔软、面包屑结构更好^[26];面条弹性高、口感更加顺滑^[27];馒头的挺立度高、内部结构及适口性好^[28]。如图6所示,锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨、肖邦磨制备全麦粉的峰值黏度分别为1 242.67、

1 276.00、1 400.00、1 592.00 cP,肖邦磨制备全麦粉的峰值黏度明显高于其他3种制粉工艺。另有研究表明最低黏度和最终黏度与面条感官品质呈极显著正相关,小麦粉黏度越低,制作的面条发黏、浑汤、易断,感官品质越差^[29-30]。锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨、肖邦磨制备全麦粉的最低黏度分别为914.00、1 016.00、1 083.33、1 211.00 cP,最终黏度分别为1 796.00、2 076.00、2 106.67、2 274.33 cP,肖邦磨制备全麦粉的最低黏度和最终黏度均明显高于其他3种制粉工艺所制备全麦粉。在不同制粉工艺中,3种直接粉碎法制备全麦粉的糊化黏度低于回添法全麦粉。这可能是由于直接粉碎法制备全麦粉的破损淀粉含量较高,对淀粉凝胶基质产生稀释和阻碍作用,同时对支链淀粉的破坏程度高,氢键缔合作用降低,导致黏度值较低^[31]。另有研究认为,小麦粉的崩解值与面包的气味、面条的表现和光滑度等品质呈显著正相关^[32]。锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨和肖邦磨制备全麦粉的崩解值分别为329.00、277.00、317.00 cP和381.00 cP,肖邦磨制备全麦粉的崩解值相较于其他3种制粉工艺更高。以上结果均表明,与其他3种制粉方式相比,肖邦磨对粉体的损伤最小,其制备的全麦粉加工性质更好。

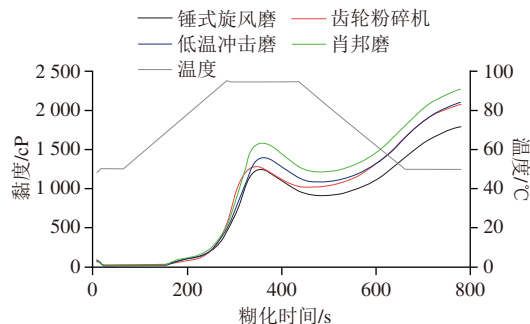


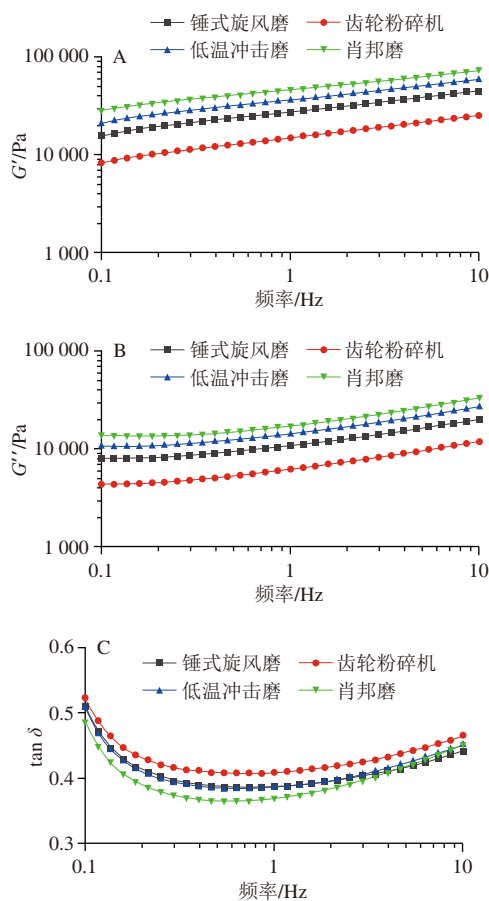
图6 不同方法碾磨全麦粉的糊化曲线

Fig. 6 Pasting curves of whole wheat flour milled by different methods

2.5 全麦面团的流变特性分析

面团的动态流变特性和面制品的品质密切相关^[33]。其中 G' 、 G'' 以及 $\tan \delta$ 可反映面团的黏弹性质。如图7所示,所有面团的 G' 和 G'' 值均随频率的增加而增大,且 $G' > G''$ 。这表明全麦面团属于弹性高于黏性的固态黏弹体^[34]。在整个扫描频率范围内,肖邦磨全麦面团的 G' 和 G'' 最大,其次是低温冲击磨全麦面团,齿轮粉碎机制备全麦面团的 G' 和 G'' 最低。研究表明,面筋网络影响面团的黏性和弹性,较强的面筋网络能更好地固定面团中的水分和气泡,从而使得面团更加黏稠,强面筋网络也会增加面团的弹性,并具有更好的膨胀性,使得 G' 和 G'' 增加^[35]。上述结果表明,相比于回添法,直接粉碎法制备的全麦粉不利于面筋网络结构的形成。在3种直接粉碎法

中, 低温冲击磨对麸皮的破碎程度最大, 其麸皮粒径最小, 对面筋蛋白交联的阻碍作用最小, 这可能导致其 G' 和 G'' 高于锤式旋风磨和齿轮粉碎机制备的全麦面团。损耗因子 $\tan \delta$ 是 G'' 和 G' 的比值, 用以描述样品弹性特征的减少量或黏性特征的增加量; $\tan \delta$ 越大, 说明体系的黏性比例较大, 流动性较强; $\tan \delta$ 越小, 说明体系的弹性比例较大, 流动性较弱^[36]。即 $\tan \delta > 1$ 时样品有类似流体的性质; $\tan \delta < 1$ 时样品有类似固体的性质。所有面团的 $\tan \delta$ 均小于1, 且随频率的升高均先降低后升高, 这表明面团有类似固体的性质, 且 $\tan \delta$ 的变化受频率的影响。其中, 肖邦磨面团的 $\tan \delta$ 显著低于其他3种直接粉碎法制备的全麦面团, 这进一步证明该面团体系的弹性比例较大, 流动性较弱, 即面筋网络结构较强。



A~C.分别为 G' 、 G'' 、 $\tan \delta$ 。

图7 不同方法碾磨全麦面团的流变性质

Fig. 7 Rheological properties of dough made from whole wheat flour milled by different methods

3 结论

本研究采用直接粉碎法(锤式旋风磨、齿轮粉碎机、低温冲击磨)和回添法(肖邦磨)制得4种平均粒径相近的全麦粉, 比较了4种全麦粉的理化性质。结果

发现, 肖邦磨制备全麦粉的损伤淀粉显著低于直接粉碎法, 其制备全麦粉的糊化特性和全麦面团的黏弹性最好, 有利于后续面制品的加工; 低温冲击磨制备全麦粉中游离多酚含量显著高于其他3种制粉方式, 且对麸皮的粉碎效果最佳。另外, 结合前期研究发现, 低温冲击磨在全麦、紫玉米和糙米等谷物粉碎中均表现优异。综合分析, 肖邦磨和低温冲击磨制备的全麦粉品质较好, 可根据后续面制品加工的实际需求进行选择。未来可以采用肖邦磨制备精白粉并分离麸皮, 然后采用低温冲击磨粉碎麸皮通过回添制备全麦粉, 从而获得一款粉体性质好、营养价值高的全麦粉。

参考文献:

- [1] 刘颖, 张云亮, 窦博鑫, 等. 全谷物在疾病调控中的作用和分子机制研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(9): 317-325. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210201-019.
- [2] HUANG Y F, HUANG J J, LIU X R. Development and validation of benzophenone derivatives in packaged cereal-based foods by solid-liquid extraction and ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Foods, 2022, 11(9): 1362. DOI:10.3390/foods11091362.
- [3] SEYER M È, GÉLINAS P. Bran characteristics and wheat performance in whole wheat bread[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 44(4): 688-693. DOI:10.1111/j.1365-2621.2008.01819.x.
- [4] LIU C, LIU L, LI L M, et al. Effects of different milling processes on whole wheat flour quality and performance in steamed bread making[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 310-318. DOI:10.1016/j.lwt.2014.08.030.
- [5] COTABARREN I, FERNÁNDEZ M P, DI BATTISTA A, et al. Modeling of maize breakage in hammer mills of different scales through a population balance approach[J]. Powder Technology, 2020, 375: 433-444. DOI:10.1016/j.powtec.2020.08.016.
- [6] HASJIM J, LI E P, DHITAL S. Milling of rice grains: the roles of starch structures in the solubility and swelling properties of rice flour[J]. Starch-Stärke, 2012, 64(8): 631-645. DOI:10.1002/star.201100204.
- [7] 计小翠. 微粉碎齿轮磨技术的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011: 1-2.
- [8] 郭晓娟. 低温冲击磨中紫玉米的粉碎机理及品质调控机制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2023. DOI:10.27232/d.cnki.gnchu.2023.001468.
- [9] YAN X D, LIU C M, HUANG A, et al. The nutritional components and physicochemical properties of brown rice flour ground by a novel low temperature impact mill[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 92: 102927. DOI:10.1016/j.jcs.2020.102927.
- [10] 胡文娟, 卓勇, 吴轩, 等. 基于SolidWorks的锤片式粉碎机智能化设计[J]. 机电工程, 2013, 30(9): 1063-1067. DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.09.007.
- [11] 侯雅琴. 不溶性膳食纤维的结构变化对其肠道菌群调节作用的影响及机制初探[D]. 南昌: 南昌大学, 2023: 28. DOI:10.27232/d.cnki.gnchu.2023.003323.
- [12] ZENG Z C, LUO S J, LIU C M, et al. Phenolic retention of brown rice after extrusion with mesophilic α -amylase[J]. Food Bioscience, 2018, 21: 8-13. DOI:10.1016/j.fbio.2017.10.008.

- [13] WAN J, ZHOU G H, LUO S J, et al. A study of the effect of amino acids on pasting and short-term retrogradation properties of rice starch based on molecular dynamics simulation[J]. *Starch-Stärke*, 2017, 69(9/10): 1600238. DOI:10.1002/star.201600238.
- [14] BOCK J E, DAMODARAN S. Bran-induced changes in water structure and gluten conformation in model gluten dough studied by Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Food Hydrocolloids*, 2013, 31(2): 146-155. DOI:10.1016/j.foodhyd.2012.10.014.
- [15] 李平, 吕莹果, 李雪琴, 等. 螺旋藻粉对面团流变性质及面筋结构的影响[J]. *食品科学*, 2023, 44(14): 63-71. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20221016-145.
- [16] BAIK B K. Strategies to improve whole wheat bread quality[J]. *Cereal Foods World*, 2019, 64(6): 0069. DOI:10.1094/cfw-64-6-0069.
- [17] 赵吉凯, 王凤成, 付文军, 等. 轻碾脱皮对全麦粉及其馒头品质的影响[J]. *食品科学*, 2017, 38(21): 158-164. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201721025.
- [18] 田潇凌, 王晓曦. 机械力化学研究现状及其在小麦制粉中的应用前景[J]. *食品科学*, 2021, 42(9): 275-282. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200503-015.
- [19] CHENG J Y, LEI S J, GAO L, et al. Effects of jet milling on the physicochemical properties of buckwheat flour and the quality characteristics of extruded whole buckwheat noodles[J]. *Foods*, 2022, 11(18): 2722. DOI:10.3390/foods11182722.
- [20] YUE F L, ZHU K X, GUO X N. Effects of damaged starch in wheat flour on qualities of frozen cooked noodles[J]. *Food and Machinery*, 2017, 33(4): 4-8; 22. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2017.04.001.
- [21] TRAN T T B, SHELAT K J, TANG D, et al. Milling of rice grains: the degradation on three structural levels of starch in rice flour can be independently controlled during grinding[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(8): 3964-3973. DOI:10.1021/jf105021r.
- [22] BREWER L R, KUBOLA J, SIRIAMORNpun S, et al. Wheat bran particle size influence on phytochemical extractability and antioxidant properties[J]. *Food Chemistry*, 2014, 152: 483-490. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.11.128.
- [23] WANG X P, ZHANG G F, LEI J, et al. Effect of particle size on phenols and antioxidant activities of wheat bran[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2016, 42(9): 160-164. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201609028.
- [24] TIAN S Q, SUN Y, CHEN Z C, et al. Functional properties of polyphenols in grains and effects of physicochemical processing on polyphenols[J]. *Journal of Food Quality*, 2019, 2019: 2793973. DOI:10.1155/2019/2793973.
- [25] WU T F, DENG C, LUO S J, et al. Effect of rice bran on properties of yogurt: comparison between addition of bran before fermentation and after fermentation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108122. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.108122.
- [26] ZI Y, SHEN H, DAI S, et al. Comparison of starch physicochemical properties of wheat cultivars differing in bread- and noodle-making quality[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 78-86. DOI:10.1016/j.foodhyd.2019.02.014.
- [27] CROSBIE G B. The relationship between starch swelling properties, paste viscosity and boiled noodle quality in wheat flours[J]. *Journal of Cereal Science*, 1991, 13(2): 145-150. DOI:10.1016/S0733-5210(09)80031-3.
- [28] 方姗姗. 小麦粉糊化特性对馒头品质的影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013: 3-5.
- [29] 张剑, 李梦琴, 任红涛. 小麦粉糊化特性与面条品质相关性研究[J]. *粮油加工*, 2010(12): 83-85.
- [30] 王育红, 远兵强, 潘治利. 小麦粉糊化特性与冷冻熟制面条品质相关性研究[J]. *粮食与油脂*, 2023, 36(1): 43-47. DOI:10.3969/j.issn.1008-9578.2023.01.011.
- [31] STONE A K, HUCL P J, SCANLON M G, et al. Effect of damaged starch and NaCl level on the dough handling properties of a Canadian western red spring wheat[J]. *Cereal Chemistry*, 2017, 94(6): 970-977. DOI:10.1094/cchem-05-17-0096-r.
- [32] 穆培源, 桑伟, 庄丽, 等. 新疆冬小麦品种品质性状与面包、馒头、面条加工品质的关系[J]. *麦类作物学报*, 2009, 29(6): 1094-1099.
- [33] LIU Y X, LI M M, BIAN K, et al. Reduction of deoxynivalenol in wheat with superheated steam and its effects on wheat quality[J]. *Toxins*, 2019, 11(7): 414. DOI:10.3390/toxins11070414.
- [34] GUO J Y, LIU F, GAN C F, et al. Effects of Konjac glucomannan with different viscosities on the rheological and microstructural properties of dough and the performance of steamed bread[J]. *Food Chemistry*, 2022, 368: 130853. DOI:10.1016/j.foodchem.2021.130853.
- [35] 范美琪, 陈林, 权煜, 等. 低温超微粉碎对全麦粉面团品质特性的影响[J]. *粮油食品科技*, 2024, 32(4): 161-168. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.04.020.
- [36] LAZARIDOU A, DUTA D, PAPAGEORGIOU M, et al. Effects of hydrocolloids on dough rheology and bread quality parameters in gluten-free formulations[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 79(3): 1033-1047. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2006.03.032.