气流粉碎分级米糠对面包加工品质的影响

杨佳欣[1,2]，李超[2]，邓媛元[1]，周鹏飞[1]，贾栩超[1]，李萍[1]，刘军[1*]，刘光[1*]
（1.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所，农业农村部功能食品重点实验室，广东省农产品加工重点实验室，广东广州 510610）（2.华南理工大学食品科学与工程学院，广东广州 510641）

摘要：为探究气流粉碎分级米糠级分对面粉加工品质的影响，以脱脂米糠（RB）为原料，通过气流粉碎分级技术制备了米糠粗级分（RBC）和细级分（RBF），分析了其营养组成和粒径变化，并探究了其对面包加工品质的影响。结果表明，气流粉碎分级处理后，不同米糠级分组成发生了变化，RBC 组膳食纤维含量提高，蛋白质和植酸含量则有所降低，而 RBF 组则呈现相反的趋势；RBC 和 RBF 组的平均粒径显著降低，降幅分别为 37.06%和 97.34%，但粒径分布均一性提高；相比于 RB 组，添加 RBC 可延长面粉稳定时间，提高面团弹性模量和粘性模量，改善米糠面包加工品质，表现为面包比容提高 46.05%和面包芯硬度降低 15.12%；而粒径更小的 RBF 组则表现出相反的作用，即降低了面粉粉质特性和面团流变特性，弱化了面包加工品质作用。对比 RB 组，粒径更小的 RBF 组更易促进面筋蛋白解聚，表现为面筋蛋白大聚集体（GMP）含量的降低（23.94%）以及游离巯基含量的增加（42.13%）；而 RBC 组未显著改变 GMP 与游离巯基含量水平。研究发现了气流粉碎分级米糠级分对面包加工品质的差异性结果，确定了 RBC 组米糠可降低米糠对面包加工品质的负面影响，研究结果有望促进米糠在面包中的应用。

关键词：米糠；气流粉碎分级；粒径；面包品质；面筋蛋白大聚集体

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.8.0206

The Impact of Jet-Milled and Air-Classified Rice Bran on Bread Processing Quality

YANG Jiaxin[1,2], LI Chao[2], DENG Yuanyuan[1], ZHOU Pengfei[1], JIA Xuchao[1], LI Ping[1], LIU Jun[1*], LIU Guang[1*]
(1.Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)(2.School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: To investigate the effects of jet-milled and air-classified rice bran fractions on bread processing quality, defatted rice bran (RB) was utilized as raw material. Rice bran coarse (RBC) and fine (RBF) fractions were obtained through jet milling and air classification techniques. Their nutritional composition and particle size distribution were analyzed, and their impacts on bread processing quality were systematically examined. It was observed that the compositional profiles of different rice bran fractions were altered by jet milling and air classification treatment. The dietary fiber content in RBC was increased, whereas protein and phytic acid contents were reduced. Conversely, opposite trends were demonstrated in that of RBF. Significant reductions in average particle size were achieved in both RBC and RBF groups, showing 37.06% and 97.34% decreases respectively, while particle size uniformity was improved. Compared with the RB group, RBC addition was found to extend dough stability time, enhance both elastic modulus (G') and viscous modulus (G'') of dough, and improve bread processing quality. These improvements were manifested through 46.05% increase in specific loaf volume and 15.12% reduction in crumb hardness. In contrast, finer RBF particles exhibited opposite effects, deteriorating farinograph characteristics and dough rheological properties while weakening bread quality attributes. It was revealed that RBF with smaller particle size promoted gluten protein depolymerization more effectively than RB, as

收稿日期：2025-02-18；修回日期：2025-07-22；接受日期：2025-07-28

基金项目：广东省自然科学基金项目（2023A1515030242）；深圳市科技计划资助（KCXFZ20230731100704006）；广东省农业科学院创新基金产业专项（202229）；广东省农业科学院科技创新战略专项基金（R2023PY-JX018、R2023PY-JG014）；广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目（加工与保鲜共性关键技术）（2024CXTD16）

作者简介：杨佳欣（2001-），女，硕士研究生，研究方向：粮油食品，E-mail：18874150901@163.com

通讯作者：刘光（1988-），男，博士，研究员，研究方向：粮食加工及功能食品，E-mail：liuguang@gdaas.cn；共同通讯作者：刘军（1981-），男，硕士，副研究员，研究方向：农产品加工，E-mail：liuj@gdaas.cn

evidenced by 23.94% decrease in glutenin macropolymer (GMP) content and 42.13% increase in free sulfhydryl groups. However, RBC showed no significant influence on these parameters. This study established differential impacts of jet-milled rice bran fractions on bread processing quality. RBC was identified as an effective modification to mitigate the negative effects of rice bran incorporation in bread production. These findings provide technical support for expanding rice bran applications in baked products.

Key words: rice bran; jet milling and air classification; particle size; bread quality; glutenin macropolymer

作为全球水稻生产与消费的主要国家，2023 年我国稻谷加工量达 2.07 亿 t，产生了超过 1500 万 t 的米糠[1]。米糠是糙米碾成精白米过程中产生的副产物，占糙米质量的 8%~10%，其中含有膳食纤维、γ-谷维素、维生素 E 及酚类化合物等生物活性物质，具有预防心血管疾病、糖尿病和肥胖等慢性疾病的健康功效[2]。然而，目前米糠主要用作畜禽饲料，未能充分发挥其营养价值和资源效益。

将米糠应用到小麦面包中符合健康消费趋势，其能够有效缓解餐后血糖波动[3]。然而，米糠的高纤维含量会带来粗糙口感，且其物理特性会破坏面筋网络完整性，从而显著劣化面包加工品质[4]。因此，需要控制添加量来降低米糠的负面影响。Espinales 等[5]强调米糠添加量需控制在 15%以下，以保证面包的可接受性。同样地，Bultum 等[6]观察到 15%以上的米糠掺入会导致面包颜色变暗，对面包感官和质地产生负面影响。除了控制添加量，米糠的微细化处理对降低其对面包品质的负面作用也有积极效果。谭属琼等[7]用超微粉碎制备不同粒径的富硒米糠粉，发现粒径减小，米糠能更均匀的分布在面筋网络中，对面筋网络的破坏作用减小。目前，米糠采用研磨粉碎或剪切粉碎方式为主，这类粉碎技术对米糠的粉碎效果有限，且存在粒径分布不均的问题[8]，影响了其应用。

气流粉碎干法分级加工技术可解决上述问题。该技术集成了气流冲击粉碎与分级分离系统，不仅能有效降低物料粒径，还能根据粒径差异对物料进行精准分级，从而提升各级分粒径均一性。与此同时，该过程还伴随特定营养活性成分富集[9]。目前，该技术主要应用到了豆类原料的物理分级，对绿豆、黄豌豆和豇豆进行干法分级，已成功实现粒径的降低和蛋白质的高效富集[10]，Skylas 等[11]对绿豆进行干法分级，细级分中蛋白质含量较原绿豆粉提升两倍，达到 62.2%。

米糠的气流粉碎加工也有零星报道，Silventoinen 等[12]采用干法分级处理脱脂米糠，所得细组分平均粒径减小到 5.1 μm，蛋白质含量由 18.5%增加到 25.7%，淀粉含量则相应降低。Wang 等[13]进一步证实，脱脂米糠干法分级后，膳食纤维含量可提高 68%，证实了该技术在功能性成分分离方面的有效性。目前，相关研究主要聚焦米糠级分的营养组成变化，而较少关注其在焙烤食品等应用场景中的功能性影响。已有研究表明，不同纤维含量的脱脂小麦胚芽分级级分均会降低面包比容[14]。与之相对，Hermans 等[15]通过对麸皮亚糊粉层进行分级，发现谷蛋白富集级分能有效改善面包体积。因此，分级处理所引起的米糠原料组成变化，势必影响其面包加工品质，然而目前针对该影响规律的系统研究仍未见报道。

因此，本研究以脱脂米糠为原料，采用气流粉碎技术制备不同粒径的米糠级分，在分析其营养组成基础上，进一步探究其对面粉粉质特性，面团流变特性以及面包品质的影响，并从面筋蛋白大聚集体（GMP）含量变化以及巯基/二硫键转化行为等角度解析其影响机制。研究结果为米糠的高值化利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

脱脂米糠，江西乡意浓有限公司；小麦面粉，南顺面粉有限公司；糖霜，太古洋行有限公司提供；动物黄油，临沂万嘉商贸有限公司；活性酵母，安琪酵母股份有限公司；其他所有化学品和试剂均符合分析纯标准。

1.2 仪器与设备

Hosokawa Alpine 100-UPZ 细磨冲击磨机，细川密克郎集团；Micro-Dough LAB 微量粉质仪，波通瑞华科学仪器有限公司；ESC1510 面包机，广东美的生活电器制造有限公司；MRO-A5000C 多功能过热水蒸汽烤箱，日本 Hitachi 公司；TA-XT-Plus 质构仪，英国 Stable Micro System Ltd.公司；AR-1500 EX 流变仪，美国 Thermo 公司；BS124S 分析天平，赛多利斯科学仪器公司。

1.3 气流粉碎分级处理

米糠的气流粉碎分级处理参照 Silventoinen 等[12]的方法执行，在研磨和分级过程中对分级轮转速做出调整。具体操作如下：脱脂米糠（RB）使用 Hosokawa Alpine 100-UPZ 细磨冲击磨机（配备不锈钢锤盘研磨器，转速 12 000 r·min^{-1}）进行研磨，分级轮转速为 8 000 r·min^{-1}，气体流量为 50 m^3·h^{-1}，进料速率为 0.5 Kg·h^{-1}。接着使用 50-ATP 分类器对研磨得到的米糠进行气流分级，分级轮转速为 16 000 r·min^{-1}，气体流量和进料速率与研磨条件保持一致。气流分级处理后得到粒径大小不同的两个级分，分别为米糠粗级分（RBC）和米糠细级分（RBF）。

1.4 气流粉碎分级米糠营养组成测定

蛋白质含量分析参照国标 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法进行测定，折算系数 5.95；总膳食纤维、可溶性膳食纤维和不可溶性膳食纤维含量测定使用 GB 5009.88-2023《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》方法分析；植酸含量测定按照 GB 5009.153-2016《食品安全国家标准 食品中植酸的测定》测定。

1.5 气流粉碎分级米糠粒径分析

参考 Xing 等[16]的方法，利用粒度仪和 Better Size 2000 激光粒度分析系统，通过往去离子水中加入样品，待遮光度为 10%后，机器自动检测结果。随后，记录各个样品的 D10、D50 和 D90 测量结果，并根据公式（1）计算粒径分布宽度值（Span）。

$$S=(D90-D10)/D50 \quad (1)$$

式中:

S——粒径分布宽度值;

D90——累计粒度分布数达到 90%时所对应的粒径，μm;

D50——累计粒度分布数达到 50%时所对应的粒径，μm;

D10——累计粒度分布数达到 10%时所对应的粒径，μm;

1.6 面粉粉质特性测定

依据 GB/T 14614-2019 的方法，利用 Micro-DoughL AB 微量粉质仪对米糠与小麦粉混合物的粉质参数进行测定。精确称量 4 g 米糠/小麦粉混合物（含有 15%的米糠），放入粉质仪的混合腔中。仪器以 63 r·min^{-1} 的速度预混 1 min，随后自动加入水并以相同速度搅拌 20 min，保持恒定温度在 30±0.2 ℃。每种混合物的最佳吸水量根据面团达到 500±20 FU 的最大一致性来确定，表示吸水率。

1.7 面包制作流程

面包的制作参考杨翠梅[17]的方法。面包配方：85 g 小麦粉、15 g 米糠、8 g 黄油、10 g 糖霜、1 g 盐、2.5 g 酵母，水的添加量根据混合物吸水率确定。首先将粉类、糖霜、黄油和溶于水的酵母倒入面包机，使用面包机的混合程序搅拌 15 min 后加入盐，继续搅拌 3 min 结束。取 50 g 面团快速揉成圆形，放入 70 mm×70 mm×40 mm 的模具中。接着在 30 ℃、相对湿度 80%的环境中发酵 60 min，烘烤采用过热水蒸气-烘烤程序，170 ℃烘烤 16 min，面包室温冷却 1 h 后脱模。

1.8 面团样品的制备

面团配方：85 g 小麦粉、15 g 米糠，水的添加量根据混合物吸水率确定。采用同 1.7 的面包机混合程序搅拌 18 min。取部分面团冷冻干燥后，研磨成粉过 100 目筛网，得到面团冻干粉。

1.9 面包品质评价

面包的高径比和比容以及面包屑的质地剖面分析（TPA）均被测定。根据 GB/T14611-2008《粮油检验小麦粉面包烘焙品质试验 直接发酵法》的标准测量面包样品的体积，面包在室温下冷却 1 h 后，将其放入 1 L 的量筒内，并向量筒倒入油菜籽，直到油菜籽与容器口齐平，记录置换出的油菜籽体积作为面包的体积。随后，用天平称量

面包的重量，精确到 0.01 g，根据（2）式计算面包比容（S）；使用游标卡尺测量面包的直径和高度，根据（3）式计算出面包高径比（L）。

$$S = \frac{V}{M} \quad (2)$$

式中:

V——面包体积，mL;

M——面包质量，g;

S——面包比容，mL g^{-1}。

$$L = \frac{H}{D} \quad (3)$$

式中:

H——面包高度，cm;

D——面包直径，cm;

L——面包高径比。

参照杜念等[18]的方法并稍作修改，使用质地分析仪测定面包样品的质构特性。面包室温冷却 1 h 后，将其切片至厚度 2 mm，测定参数如下：探头型号选用 P36R，测前、测中、测后速度分别为 1.0、1.0、5.0 mm s^{-1}，触发力为 5 g，面包芯压缩比为 50%，两次压缩间隔时间为 10 s。

1.10 面团流变特性测定

参照 Liu 等[19]的方法，将面团放在流变仪的测试平行板中心，并将上下平板之间的距离精确调整至 1.5 mm。使用刮刀刮去平行板外侧多余的面团，并在平板周围添加植物油，以防止面团边缘干燥。让面团静置 5 min 后启动频率扫描程序，在 0.1 至 10 Hz 的频率范围内，对线性黏弹性区域进行频率扫描，记录面团的弹性模量（*G'*）和粘性模量（*G"*）。

1.11 面团麦谷蛋白大聚体（GMP）含量测定

麦谷蛋白大聚体（Glutenin Macropolymer，GMP）含量测定参照高恩红等[20]的方法，称取 1 g 面团冻干粉，加入 25 mL 1.5%十二烷基硫酸钠（SDS）溶液（*m/V*，用 0.05 mol/L pH 值为 6.8 的磷酸缓冲溶液配置），室温条件下 200 r min^{-1} 振荡 1 h，7 000 r min^{-1} 离心 20 min，沉淀冷冻干燥后，通过凯氏定氮法测定蛋白质含量。根据公式（4）计算 GMP 百分含量（M）。

$$M = \frac{c \cdot m_1}{m_2} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

c——沉淀冷冻干燥后的蛋白质含量，%;

m_1——沉淀冷冻干燥后的质量，g;

m_2——面团冻干粉质量，g;

M——GMP 百分含量，%。

1.12 面团游离巯基含量测定

按照 Zhang 等[21]的方法进行。将 15 mg 面团冻干粉添加 1 mL Tris-甘氨酸蛋白变性缓冲液（86.0 mmol L^{-1} Tris、90.0 mmol L^{-1} 甘氨酸、4.0 mmol L^{-1} EDTA-2Na、8.0 mol L^{-1} 尿素，pH 值 8.0）中，震荡 10 min 后离心。取 100 μL 上清液、100 μL Tris-甘氨酸蛋白变性缓冲液和 33 μL 新鲜配制的 4.0 mg mL^{-1} DTNB 溶液混合，在 30 ℃下孵育 30 min，并在 412 nm 处测定吸光度。使用一系列不同浓度的 GSH 标准样品绘制标准曲线。根据公式（5）计算面

团游离巯基含量（Y）：

$$Y(\mu mol \cdot g^{-1}) = (125.04\Delta x - 13.37) \times N \quad (5)$$

式中：

Y——面团游离巯基含量，μmol·g^{-1}；

Δ*x*——实验组吸光值减去对照组吸光值的差值；

N——稀释倍数。

1.13 数据统计与分析

所有实验均重复进行 3 次，实验结果以平均值±标准差来表示。运用 Microsoft Excel 进行数据整理，使用 SPSS 22.0 进行数据差异性分析，用 Origin 2025 软件绘制图形。

2 结果与讨论

2.1 气流粉碎分级米糠营养组成分析

脱脂米糠（RB）经气流粉碎分级处理之后，得到了米糠粗级分（RBC）和米糠细级分（RBF）两个级分，其营养组成变化见表 1。经过气流粉碎分级之后，相比于 RB，RBF 中蛋白质和植酸含量增加，增幅分别为 23.46%和 84.36%，而膳食纤维含量降低超过一半至 17.64%；与此相反，RBC 中蛋白质和植酸含量则明显下降，减少至 17.30%和 8.15%，总膳食纤维含量提高了 11.31%，达到 40.56%。这一结果表明，经过气流粉碎分级处理后，米糠中的蛋白质富集在了 RBF 中，而膳食纤维则富集在了 RBC 中，这与蛋白颗粒粒径比纤维颗粒粒径更小，更易富集到细级分有关[22]。植酸在细级分富集的原因可能是其与蛋白质结合更加紧密[23]。Silventoinen 等[12]使用气流粉碎分级技术对米糠进行处理，发现细级分中蛋白质和植酸含量显著增加，而粗级分中膳食纤维含量显著增加，与本研究结果趋势相符。

此外，分级米糠除了总膳食纤维含量发生了改变，其可溶和不可溶膳食纤维的组成比例也发生了变化。RB 组和 RBC 组中可溶和不可溶膳食纤维的比例均为 0.20，而 RBF 的比例则变成 0.78。研究发现，可溶和不可溶膳食纤维的比例接近 1:1 后，可以显著改善肠道微生物的稳态，提高短链脂肪酸的生成，调节血糖和血脂[24]。因此，单独从膳食纤维组成变化角度来看，RBF 对肠道健康产生多方面的积极影响。植酸是一种典型的抗营养因子，一方面可以螯合钙、铁和锌等多种矿物质离子，形成不溶性络合物，降低这些矿物质的生物利用率[25]；此外，植酸还可以与蛋白质结合，形成难溶性复合物，影响蛋白质的消化吸收[26]。因此，从植酸含量变化角度来看，RBC 组米糠更易被消化吸收。

表 1 气流粉碎分级米糠基本营养组成（干基）

Table 1 Nutritional Composition of Rice Bran after jet milling and air classification (on a Dry Basis)

分组	蛋白质含量/%	膳食纤维含量/%	不可溶性膳食纤维含量/%	可溶性膳食纤维含量/%	植酸含量/%
RB	18.50±0.15^{b}	36.44±0.2^{b}	30.39±0.08^{b}	6.05±0.12^{c}	10.87±1.57^{b}
RBC	17.30±0.06^{c}	40.56±0.23^{a}	33.75±0.19^{a}	6.81±0.20^{b}	8.15±0.28^{c}
RBF	22.84±0.11^{a}	17.64±0.14^{c}	9.94±0.12^{c}	7.73±0.10^{a}	20.04±1.19^{a}

注：同一列中具有不同字母的平均值具有显著差异（*P*<0.05）；RB：脱脂米糠组，RBC：米糠粗级分组，RBF：米糠细级分组。

2.2 气流粉碎分级米糠颗粒粒径分析

米糠气流粉碎分级级分的粒径分布如图 1 及表 2 所示。D10、D50 和 D90，分别代表样品中 10%、50%或 90%的颗粒小于该粒径，其中 D50 值表示样品的平均中位直径。相比于 RB 组，RBC 和 RBF 组粒径分布曲线的峰值对应的粒径逐渐减小（图 1），D50 值显著降低（表 2），表明气流粉加工显著降低了两个米糠级分的平均粒径。

此外，Span 值通常指的是粒径分布的宽度或异质性，可用于表征非对称分布颗粒体系，其值越大，说明颗粒尺寸分布越宽[27]。如图 1 所示，RBC 组相比于 RB 组，粒径分布曲线形状类似，但大颗粒的体积密度逐渐减少，而小颗粒的体积密度增加，并且 Span 值降低了 11.6%，这一结果表明 RBC 组粒径更小，粒径分布更均匀，这主

要由于米糠粉碎导致粒径减小，同时气流分级使更小粒径的米糠富集在了 RBF 中，从而改善了 RBC 的粒度均匀性。RBF 组 D90 值＜10 μm，只存在一个均一的对称峰，Span 值显著减小到 2.08，说明粒度均匀性得到了进一步改善。一般而言，米糠中蛋白质颗粒尺寸较膳食纤维更小，这解释了 RBF 中富集了更多的蛋白质，而 RBC 中膳食纤维含量增加的原因。总之，气流粉碎分级可以实现米糠级分粒度减小并提高粒径分布的均一性。

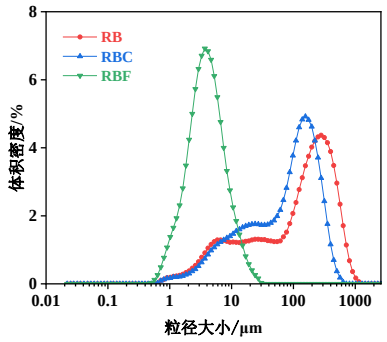

图 1 气流粉碎分级米糠的粒径分布曲线

Fig.1 Particle Size Distribution Curves of Rice Bran after Jet Milling and Air Classification

表 2 气流粉碎分级米糠粒径分布

Table 2 Particle Size Distribution of Rice Bran after Jet Milling and Air Classification

分组	D10 值/μm	D50 值/μm	D90 值/μm	Span 值
RB	5.69±0.05^{b}	135.98±2.05^{a}	439.58±1.73^{a}	3.19±0.06^{a}
RBC	6.65±0.07^{a}	85.58±1.40^{b}	248.16±3.49^{b}	2.82±0.01^{b}
RBF	1.45±0.00^{c}	3.62±0.01^{c}	8.98±0.05^{c}	2.08±0.01^{c}

注：同一列中具有不同字母的平均值具有显著差异（P<0.05）；RB：脱脂米糠组，RBC：米糠粗级分组，RBF：米糠细级分组。

2.3 气流粉碎分级米糠对面粉粉质特性影响

粉质特性中面团的形成时间和稳定时间与面团强度呈正相关，弱化度值越小，则表明面筋网络结构越稳定。表 3 展示了米糠及其级分对面粉粉质特性的影响。结果显示，米糠加入后，面粉的粉质特性显著减弱，具体表现为形成时间和稳定时间显著缩短，弱化度显著增大。这主要是由于米糠中的纤维颗粒在面团形成过程中增加了物理空间阻碍，破坏了蛋白质分子间的交联，从而导致面筋网络结构的破坏[4]。对比 RBC 和 RBF 样品发现，后者的形成时间和稳定时间更短，弱化度更高（P<0.05），说明 RBF 面团强度低于 RBC。这可能是 RBF 粒径过小所致，研究表明粒径更小的麦麸颗粒相比粗麦麸减弱了面团混合过程中的耐受性，并缩短混合时间[28]。此外，相比于 RB 组，RBC 组样品吸水率显著提高 4.35%的原因应该与其含有更多膳食纤维有关，膳食纤维具有较高的吸水能力，可以与水分子间主要通过氢键发生相互作用，因此增加了吸水率[29]。

表 3 气流粉碎分级米糠对面粉粉质特性影响

Table 3 Effects of Jet-Milled and Classified Rice Bran on the Farinograph Characteristics of Wheat Flour

分组	吸水率（m/m）/%	形成时间/min	稳定时间/min	弱化度/FU
Control	62.23±0.15^{c}	7.70±0.28^{a}	11.07±0.24^{a}	50.00±2.83^{c}
RB	63.20±0.14^{b}	4.40±0.14^{b}	4.51±0.21^{c}	101.50±4.95^{b}
RBC	65.95±0.78^{a}	4.35±0.07^{b}	5.10±0.14^{b}	97.00±1.41^{b}
RBF	62.95±0.21^{bc}	3.65±0.07^{c}	4.30±0.07^{c}	114.00±4.24^{a}

注：同一列中具有不同字母的平均值具有显著差异（P<0.05）；Control：未添加米糠组，RB：脱脂米糠组，RBC：米糠粗级分组，RBF：米糠细级分组。

2.4 气流粉碎分级米糠对面团流变特性影响

面筋蛋白的主要成分包括麦谷蛋白和麦醇溶蛋白，这两种蛋白在面团形成过程通过分子之间和分子内交联作

用，赋予了面团独特的粘弹性和延伸性，进而影响面包的最终品质。使用流变仪可以评价米糠对面团粘弹特性的影响，具体结果如图 2 所示。由图可见，各组面团 G'（弹性模量）值均高于 G''（粘性模量）值，说明都表现出弹性行为。而对比对照组和米糠添加组发现，添加米糠使面团的 G' 和 G'' 降低，这是由于米糠颗粒破坏了面筋网络的连续性，以及膳食纤维的存在会干扰面筋蛋白的交联，导致面团的弹性和延展性减弱[4]。相比 RB 组，RBC 组面团粘弹性增大，RBF 组面团粘弹性减小，这与面粉粉质特性数据一致，说明 RBF 较 RBC 对面筋网络结构的负面影响更大。

通常情况下，降低米糠的粒径能减少其对面粉面筋网络连续性的物理破坏，进而有助于提升面团的粘弹性[7]。因此，这一发现可以解释 RBC 组面团粘弹性增大的原因。然而，本研究也发现，粒径更小的 RBF 组却对面粉粉质特性、面团流变特性以及面包品质产生了负面影响，其原因可能与营养组成的变化有关。植酸是米糠中含量较高的一种抗营养因子，其带有高密度负电荷，而麦谷蛋白包含大量带正电荷的氨基酸残基（如精氨酸、赖氨酸等），易与植酸发生静电相互作用。这种结合会阻碍面筋蛋白中二硫键的正常形成，抑制蛋白质分子间的交联，从而破坏面筋网络的结构和稳定性，导致面团的流变性能下降[30]。本研究结果显示，RBF 组的植酸含量较对照组显著提高了 84.36%，其大幅上升很可能是引起该组面团粘弹性降低的主要原因，在此情况下，植酸所带来的负面效应远超过粒径减小可能产生的积极作用。相比之下，RBC 组的植酸含量较 RB 组降低了 25.02%，植酸含量的减少也可能为其改善面粉加工品质提供了另一方面的解释。

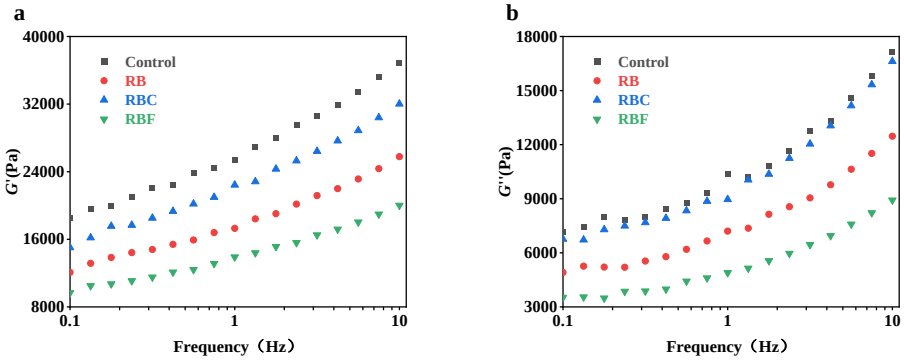

图 2 分级米糠粉面团流变特性

Fig.2 Rheological Properties of Dough with/without Jet-Milled and Air-Classified Rice Bran

注：a 为面团弹性模量 G'；b 为面团粘性模量 G''。

2.5 气流粉碎分级米糠对面包品质影响

2.5.1 物理品质评价

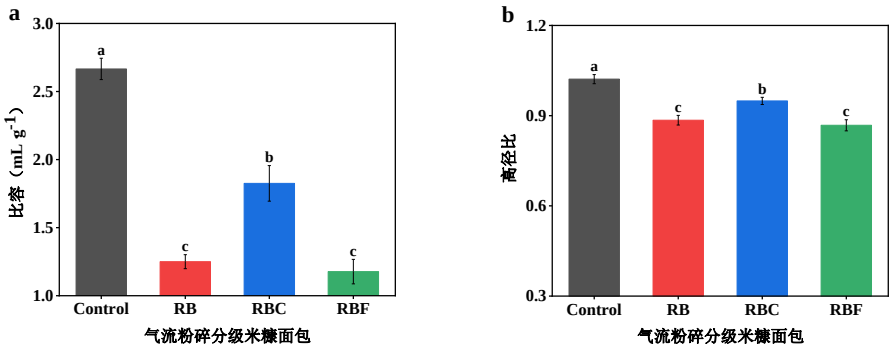

图 3 气流粉碎分级米糠面包物理品质评价

Fig.3 Evaluation of Physical Quality of Bread with/without Jet-Milled and Air-Classified Rice Bran

注：a，面包比容变化；b，面包高径比变化。图中不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

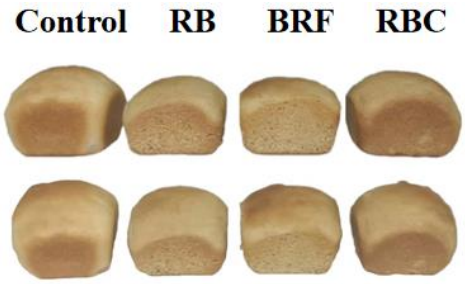

图 4 气流粉碎分级米糠面包实物图

Fig.4 Photographs of Bread with/without Jet-Milled and Air-Classified Rice Bran

面包的比容可以客观反映面团的体积膨胀的程度和气体保持能力，而高径比可以反映面包外观形状中面包的挺立程度。通常面包的比容和高径比越大，其品质越好，越容易受到消费者的喜爱。

不同米糠面包的比容和高径比结果如图 3 所示，由图可得，相比于对照组，添加米糠的面包比容和高径比都显著降低，其面包外观的变化也可从图 4 更直观地看出。米糠影响面包品质的原因与其加入后破坏了面筋网络结构，导致面团持气性减弱，从而降低了面包的膨胀度有关。相比于 RB 组，RBF 组比容和高径比无显著性差异，但 RBC 组比容和高径比分别显著提高 46.05%和 7.23%，说明 RBC 样品的加入有利于改善面包的物理品质，该结果与面团流变特性和面粉粉质特性数据相符。Park 等[31]的研究表明，植酸盐的添加会会降低面团中谷蛋白大聚体（GMP）含量并减小面包体积。另有研究指出，麦麸和米糠经脱植酸处理后对面包品质的不利影响明显减弱，这进一步证明了植酸含量变化对面包加工品质的重要影响[32]。

2.5.2 质构品质评价

物性质构仪能够有效模拟食物在口腔内的咀嚼过程，快速且客观地评估气流粉碎分级米糠对面包芯质地的影响，面包芯硬度、咀嚼性和弹性等。质构特性结果如表 4 所示。相比于对照组，添加米糠后，面包的硬度和咀嚼性提高，而弹性降低。通常，硬度、咀嚼性和面包的品质呈负相关，弹性则具有正相关[33]，因此，质构特性进一步说明了添加米糠对面包芯产生的负面影响。相比于 RB 组，RBC 组面包芯硬度和咀嚼性分别下降 15.12%和 6.08%，弹性和回复性改善 6.30%和 6.14%，而 RBF 硬度和弹性无显著性差异，说明 RBC 组面包芯质构特性优于 RB 组，与面包比容和高径比结果相符。Wang 等[34]的研究也显示，添加较粗荞麦壳（500~100 μm）对面包体积与硬度影响较小，而较细组分（50~10 μm）则显著降低面包体积、增加硬度，与本实验结论一致。

表 4 气流粉碎分级米糠面包质构特性

Table 4 Textural Properties of Bread with/without Jet-Milled and Air-Classified Rice Bran

分组	硬度/g	弹性/g	回复性/g	咀嚼性/g
Control	1 648.26±31.37^{c}	0.90±0.00^{a}	0.76±0.00^{a}	1 097.48±74.24^{c}
RB	2 686.60±77.17^{a}	0.76±0.02^{c}	0.63±0.00^{d}	1 340.69±33.81^{ab}
RBC	2 280.70±85.64^{b}	0.80±0.01^{b}	0.67±0.00^{b}	1 259.16±40.99^{b}
RBF	2 667.34±28.40^{a}	0.78±0.02b^{c}	0.65±0.00^{c}	1 392.57±116.61^{a}

注：同一列中具有不同字母的平均值具有显著差异（P<0.05）；Control：未添加米糠组，RB：添加 15%脱脂米糠组，RBC：添加 15%米糠粗级分组，RBF：添加 15%米糠细级分组。

2.6 气流粉碎分级米糠对面粉加工品质影响机制初探

基于 RBC 组米糠面包具有最大的比容和高径比，以及最好的质构特性这一结果，拟从游离巯基和 GMP 含量的角度来初步探究分级米糠对面粉加工品质的影响机制。

2.6.1 面团游离巯基含量

二硫键是一种能反映面筋蛋白特性变化的重要化学键，其存在能稳定面筋网络结构，故对面团游离巯基浓度的变化作了进一步的测定，结果见图 5。相较于对照组，米糠处理组游离巯基含量显著增加，意味着二硫键含量显著减小，说明米糠的加入破坏了维持面筋蛋白网络结构的共价键。相比于 RB 组，RBC 组游离巯基含量无显著性变化，但 RBF 组则显著提高，增幅达 42.13%，说明添加 RBF 对面团中二硫键的破坏作用要强于 RBC 面团。二硫键含量减少会降低面筋网络强度，该结果与面团流变特性、面包品质结果相符。

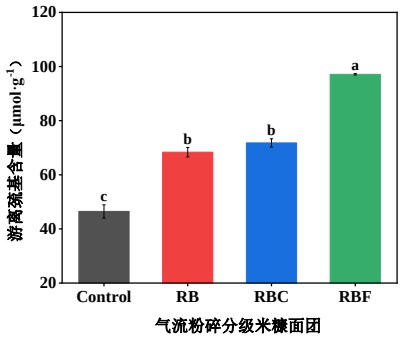

图 5 气流粉碎分级米糠面团游离巯基含量

Fig.5 Free Sulfhydryl Content in Dough with/without Jet-Milled and Air-Classified Rice Bran

注：图中不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。下图同。

2.6.2 面团 GMP 含量

GMP 是 SDS-不可溶面筋蛋白，被称之为面筋蛋白大聚集体，在面团的流变性质以及面包质量中起着决定性作用。分级米糠面团中 GMP 含量变化结果如图 6 所示。从图中可以看出，分级米糠处理组的 GMP 含量显著低于对照组，并且在分级米糠样品中，RBC 组 GMP 含量与 RB 组无显著性差异，而 RBF 组其含量则降低了 24.0%。GMP 被认为对面团性质贡献最大，其含量与面团强度和面包体积呈显著正相关[35]，因此，较低的 GMP 含量势必导致 RBF 组面粉加工品质最差。面团中 GMP 含量与其二硫键交联程度有关，二硫键交联程度越高，其 GMP 含量越高[36]，因此，RBF 组面团中 GMP 含量降低也从侧面反映起二硫键被严重破坏，这与 RBF 组面筋蛋白巯基含量最高的结果相一致。

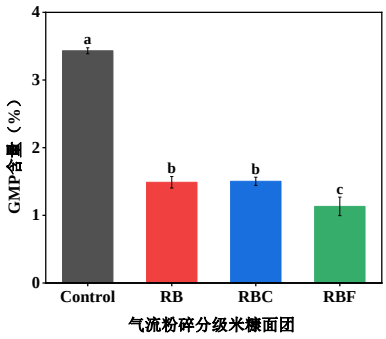

图 6 气流粉碎分级米糠面团 GMP 含量

Fig.6 Content of GMP in Dough with/without Jet-Milled and Air-Classified Rice Bran

3 结论

研究探明了气流粉碎分级米糠营养组成及粒径分布规律，明确了不同米糠级分对面粉加工品质影响。结果表明，米糠粗级分（RBC）中膳食纤维含量富集至 40.56%，而细级分（RBF）中蛋白质和植酸含量分别增加 23.46%和 84.36%；两种级分的粒径均显著减小，其中 RBF 组粒径降低 2 个数量级，且粒径分布更为均匀。与未处理的米糠组比，添加 RBF 显著缩短了面团形成时间和稳定时间，降低了弹性模量和粘性模量，同时减小了面包比容并提高面包芯硬度，表明其对面粉加工品质产生了负面影响，这归因于 RBF 较大的比表面积和较高的植酸含量，导致面筋蛋白大聚集体发生解聚，面筋网络结构遭到破坏；相反，添加 RBC 则改善了面粉粉质特性和面团流变特性，提升了面包加工品质，有效缓解了原米糠对产品品质的不利影响。本研究结果表明，通过气流粉碎分级技术不仅可以改变米糠的理化特性，还能定向调控其功能组分，从而改善其在食品体系中的加工适应性。研究成果为米糠在面制品中的高值化应用提供了理论依据和技术支持。

参考文献

[1] 熊晓宝,陈方奇,陈玉新.关于米糠油产业高质量发展的思考[J].中国粮食经济,2024,12:36-38.

[2] TAN B L, NORHAIZAN M E, CHAN L C. Rice bran: from waste to nutritious food ingredients [J]. Nutrients, 2023, 15(11): 2503.

[3] NI Q, RANAWANA V, HAYES H E, et al. Addition of broad bean hull to wheat flour for the development of high-fiber bread: effects on physical and nutritional properties [J]. Foods, 2020, 9(9): 1192.

[4] DOAN N T T, LAI Q D, VO H V, et al. Influence of adding rice bran on physio-chemical and sensory properties of bread [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2021, 15(6): 5369-5378.

[5] ESPINALES C, CUESTA A, TAPIA J, et al. The effect of stabilized rice bran addition on physicochemical, sensory, and techno-functional properties of bread [J]. Foods, 2022, 11(21): 3328.

[6] BULTUM L E, EMIRE S A, WOLDE Y T. Influence of full fat rice bran from Ethiopian rice milling industries on nutritional qualities, physicochemical and sensory properties of bread and biscuits [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14: 2253-2261.

[7] 谭属琼,马森泉,李耀,等.米糠在超微粉碎下的粉体特性及其对小麦面粉加工特性的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(10):139-145.

[8] ZHAO G, ZHANG R, DONG L, et al. Particle size of insoluble dietary fiber from rice bran affects its phenolic profile, bioaccessibility and functional properties [J]. Lwt, 2018, 87: 450-456.

[9] LI Y, WANG L, WANG H, et al. Correlation of microstructure, pore characteristics and hydration properties of wheat bran modified by airflow impact mill [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 77: 102977.

[10] SCHLANGEN M, DINANI S T, SCHUTYSER M A I, et al. Dry fractionation to produce functional fractions from mung bean, yellow pea and cowpea flour [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 78: 103018.

[11] SKYLAS D J, WHITEWAY C, JOHNSON J B, et al. Dry fractionation of Australian mungbean for sustainable production of value-added protein concentrate ingredients [J]. Cereal Chemistry, 2024, 101(4): 720-738.

[12] SILVENTOINEN P, ROMMI K, HOLOPAINEN-MANTILA U, et al. Biochemical and techno-functional properties of protein- and fibre-rich hybrid ingredients produced by dry fractionation from rice bran [J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12: 1487-1499.

[13] WANG J, SUO G, DE WIT M, et al. Dietary fibre enrichment from defatted rice bran by dry fractionation [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 186: 50-57.

[14] LONGO A, AMENDOLAGINE G, MIANI M G, et al. Effect of air classification and enzymatic and microbial bioprocessing on defatted durum wheat germ: characterization and use as bread ingredient [J]. Foods, 2024, 13(12): 1953.

[15] HERMANS W, DE BONDT Y, LANGENAEKEN N A, et al. Unravelling the bread-making functionality of gluten-rich sub-aleurone flour obtained by dry fractionation of wheat miller's bran [J]. Food Research International, 2024, 197: 115230.

[16] XING Q, UTAMI D P, DEMATTEY M B, et al. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 66: 102480.

[17] 杨翠梅.不同分级粒径米糠对面包加工品质及其体外消化特性影响[D].广州:仲恺农业工程学院,2023.

[18] 杜念,邓媛元,魏振承,等.重组小麦静息巯基氧化酶的表达、酶学特性及其对面包品质的影响[J].生物工程学报,2021,37(2):593-603.

[19] LIU G, WANG J J, HOU Y, et al. Recombinant wheat endoplasmic reticulum oxidoreductin 1 improved wheat dough properties and bread quality [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(10): 2162-2171.

[20] 高恩红,常道柯,田潇凌,等.彩麦全麦粉特性及其对饼干品质的影响[J].食品安全质量检测学报,2024,15(18):114-122.

[21] ZHANG T, GUAN E, YANG Y, et al. Underlying mechanism governing the influence of peanut oil addition on wheat dough viscoelasticity and Chinese steamed bread quality [J]. LWT, 2022, 156: 113007.

[22] GUJRAL H S, ROSELL C M. Improvement of the breadmaking quality of rice flour by glucose oxidase [J]. Food Research International, 2004, 37(1): 75-81.

[23] PINELI L de L de O, BOTELHO R B A, ZANDONADI R P, et al. Low glycemic index and increased protein content in a novel quinoa milk [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1261-1267.

[24] WANG L, WANG J, WANG J, et al. Soluble and insoluble dietary fiber at different ratios: Hydration characteristics, rheological properties, and ameliorative effects on constipation [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101996.

[25] MINIHANE M A, RIMBACH G. Iron absorption and the iron binding and anti-oxidant properties of phytic acid [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2002, 37(7): 741-748.

[26] ING X, YANG X, WANG X, et al. Effect of exogenous phytate on gelation and in vitro digestibility of CaCl2-induced soy protein isolate [J]. ACS Food Science & Technology, 2024, 4(5): 1278-1286.

[27] MUTTAKIN S, KIM M S, LEE D U. Tailoring physicochemical and sensorial properties of defatted soybean flour using jet-milling technology [J]. Food Chemistry, 2015, 187: 106-111.

[28] ZHANG D C, MOORE W R. Effect of wheat bran particle size on dough rheological properties [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1997, 74: 490-496.

[29] XIE L, LU L, ZHAO L, et al. Improvement of okara noodle quality by modifying the soluble/insoluble dietary fibre ratio [J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141566.

[30] HAROS M, ROSELL C M, BENEDITO C. Use of fungal phytase to improve breadmaking performance of whole wheat bread [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(11): 5450-5454.

[31] PARK Y E, FUERST P E, BAIK B. Phytate negatively influences wheat dough and bread characteristics by interfering with cross-linking of glutenin molecules [J]. Journal of Cereal Science, 2016, 70: 199-206.

[32] ÖZKAYA B, BAUMGARTNER B, ÖZKAYA H. Effects of concentrated and dephytinized wheat bran and rice bran addition on bread properties [J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(1): 84-93.

[33] NAZIR A, SOOD M, BANDRAL J D, et al. Physicochemical and microbial stability of wheat bread as influenced by the supplementation of radiofrequency stabilized rice bran [J]. Applied Biological Research, 2020, 22(2): 147.

[34] WANG L, LI Y, GUO Z, et al. Effect of buckwheat hull particle-size on bread staling quality [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134851.

[35] SCHUTYSER M, PELGROM P J M, GOOT A J, et al. Dry fractionation for sustainable production of functional legume protein concentrates [J]. Trends in Food Science and Technology, 2015, 45: 327-335.

[36] FENG Y, ZHANG H, WANG J, et al. Dynamic changes in glutenin macropolymer during different dough mixing and resting processes [J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2021, 26(3): 541.