

徐高孟,戴涛涛,吕成良,等. 双螺杆挤压联合低温冲击磨技术改良大米抛光粉品质 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 104–113.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120058

XU Gaomeng, DAI Taotao, LÜ Chengliang, et al. Twin-screw Extrusion Combined with Low Temperature Impact Mill Improves the Quality of Rice Polishing Powder[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 104–113. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120058

· 研究与探讨 ·

双螺杆挤压联合低温冲击磨技术改良大米抛光粉品质

徐高孟¹,戴涛涛^{1,2},吕成良¹,阳 莎¹,邓利珍^{1,2},梁瑞红¹,李 傲¹,刘成梅¹,陈 军^{1,2,*}

(1.食品科学与资源挖掘全国重点实验室,南昌大学,江西南昌 330000;

2.江西南大创院食品科技有限公司,江西南昌 330200)

摘 要:为解决大米抛光粉易酸败变质的问题和改善其理化性质,本文通过双螺杆挤压对大米抛光粉进行稳定化处理,研究不同挤压温度对大米抛光粉储藏稳定性及营养性质的影响;在最佳挤压温度下,进一步利用低温冲击磨在空气分级机不同转速条件下(300、600、1200、1800 r/min)制备不同粒径的大米抛光粉(SR-1、SR-2、SR-3、SR-4),研究空气分级机转速对大米抛光粉挥发性香气化合物及理化性质的影响。结果表明,挤压处理后大米抛光粉的脂肪酶活性从 12.94 mg/g 显著降低至 2.18 mg/g。储藏至第 150 d,未经处理的大米抛光粉的脂肪酸值为 255.57 mg KOH/100 g,而挤压后样品的脂肪酸值仅为 121.90 mg KOH/100 g。挤压处理后,大米抛光粉中膳食纤维、 γ -氨基丁酸和 γ -谷维素也得到了较好的保留。低温冲击磨可以促进大米抛光粉中挥发性香气化合物的释放,其中 SR-3 总浓度最高。基于偏最小二乘判别法,根据变量重要性投影值筛选出 9 个差异标记组分,证实了 SR-3 风味最浓郁。随着大米抛光粉粒径降低,其比表面积逐渐增大,体积密度呈现逐渐减小的趋势;白度指数从 66.08 显著增加到 76.61;吸水性和溶解性分别从 1.77 g/g 和 24% 显著增加到 2.37 g/g 和 31%;傅里叶变换红外光谱分析表明,低温冲击磨处理破坏了淀粉颗粒中的氢键,导致了更多的游离羟基暴露。研究结果可为高品质大米抛光粉加工提供理论依据和技术支撑。

关键词:大米抛光粉,稳定化,超微粉碎,营养性质,理化性质

中图分类号:TS212.4

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2024)19-0104-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120058



本文网刊:

Twin-screw Extrusion Combined with Low Temperature Impact Mill Improves the Quality of Rice Polishing Powder

XU Gaomeng¹, DAI Taotao^{1,2}, LÜ Chengliang¹, YANG Sha¹, DENG Lizhen^{1,2}, LIANG Ruihong¹, LI Ti¹,
LIU Chengmei¹, CHEN Jun^{1,2,*}

(1.State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang 330000, China;

2.International Institute of Food Innovation Co., Ltd., Nanchang University, Nanchang 330200, China)

Abstract: In order to solve the problem of rancidity of rice polishing powder and improve its physicochemical properties, the effects of twin-screw extrusion under different extrusion temperatures on the storage stability and nutritional properties of rice polishing powder were studied. Under the optimum extrusion temperature, the rice polishing powder (SR-1, SR-2, SR-3, and SR-4) with different particle sizes was prepared by low temperature impact mill (LTIM) under different air classifier speeds (300, 600, 1200, and 1800 r/min). The effects of the air classifier speed on volatile aroma compounds and physicochemical properties of rice polishing powder were studied. The results showed that the lipase activity of rice polishing powder decreased significantly from 12.94 mg/g to 2.18 mg/g after extrusion treatment. Stored at the 150th day,

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 国家自然科学基金(32160572)。

作者简介: 徐高孟(1999-),男,硕士研究生,研究方向:食品加工新技术,E-mail: 908505376@qq.com。

* 通信作者: 陈军(1986-),男,博士,研究员,研究方向:食品资源的开发利用、食品加工新技术,E-mail: chen-jun1986@hotmail.com。

the fatty acid value of untreated rice polishing powder was 255.57 mg KOH/100 g, while the fatty acid value of the extruded sample was only 121.90 mg KOH/100 g. After extrusion treatment, dietary fiber, γ -aminobutyric acid, and γ -oryzanol in rice polishing powder were also well retained. LTIM promoted the release of volatile aroma compounds in rice polishing powder, and SR-3 had the highest concentration. Based on the partial least square discriminant, 9 differentially labeled components were screened according to the importance projection of variables, and it was confirmed that SR-3 had the strongest flavor. With the decrease of particle size, the specific surface area of rice polishing powder gradually increased, and the bulk density showed a decreasing trend. The whiteness index increased significantly from 66.08 to 76.61. Water absorption ability and solubility increased significantly from 1.77 g/g and 24% to 2.37 g/g and 31%, respectively. Fourier transform infrared spectroscopy analysis showed that LTIM destroyed hydrogen bonds in starch particles, resulting in more free hydroxyl group exposure. The results can provide a theoretical basis and technical support for the processing of high-quality rice polishing powder.

Key words: rice polishing powder; stabilization; superfine grinding; nutritional properties; physicochemical properties

中国是世界上稻谷产量最丰富的国家,据国家统计局统计,中国 2022 年稻谷产量高达 2.085 亿吨。大米抛光粉是糙米抛光加工中产生的副产品,主要由糙米糊粉层及胚部组成,约占糙米籽粒重量的 8%,富集有生理活性很高的米胚蛋白、 γ -氨基丁酸、 γ -谷维素等营养物质。此外,大米抛光粉具有浓郁的米香味和微甜的口感,可作为一种营养丰富的淀粉基食品功能配料应用于食品工业。然而,由于糊粉层含有极易氧化酸败的不饱和脂肪酸,导致大米抛光粉货架期较短,极大程度上限制了其在食品工业中的应用^[1]。稳定化处理可使脂肪氧化酶、脂氧合酶等氧化酸败相关酶失去活性,从而抑制脂肪氧化酸败,得到稳定化产品^[2]。对于粉体而言,挤压处理被认为是一种最适合工业化生产的稳定化处理方法,具有可连续化生产、有效保留营养物质等优势^[3]。通常,经挤压膨化处理后的物料会被研磨成粉末,以方便应用于各种面制品或米制品中,如面条、面包、米粉等^[4]。然而,挤压处理后的米糠或糙米经普通粉碎后往往具有较差的理化性质,如较低的溶解度^[5],较差的吸水能力^[6],以及暗黄的色泽^[7]。因此,有必要对经挤压稳定化处理后的大米抛光粉进一步加工,使其理化性质得到改善。

相比于传统的粉碎方式,超微粉碎技术被广泛报道可以有效改善粉体理化性质,例如色泽接受度较高^[8],吸水性和溶解性较好^[9]。此外,风味作为消费者评判产品可接受度的重要指标之一,超微粉碎可以降低粉体粒径,改变孔隙结构,从而有利于香气物质的释放,改善风味^[10]。干法粉碎和湿法粉碎是两种主要的超微粉碎方式,干法粉碎主要用于制粉加工。在干法粉碎中,气流磨、球磨和振动磨是三种常见的超微粉碎设备。然而,球磨和振动磨容易引起温度升高,从而对物料中香气物质产生不利影响^[11]。气流磨适合热敏性物料加工,但会产生较多的粉尘^[11]。新型低温冲击磨可以实现物料的超细粉碎,并可以保持粉碎腔内温度在 20 ℃ 以下。此外,其生产容量达 10~80 kg/h,可以很好地满足工业化生产。低温冲击磨工作原理如图 1 所示。在粉碎腔中,物料在高速旋转的转子的加速作用下,与衬板的钝齿发生冲撞,并在转盘的锤头与衬板的齿面之间发生冲击剪切,从而达到粉碎效果。在气流的作用下,破碎的颗粒进入分级腔内。在气流场域内,颗粒同时受到旋转的离心力和气流曳力两种作用力。粗颗粒所受离心力大于气流曳力,被抛向筒壁,沿筒壁落回粉碎腔继续进行被粉碎,符合粒径要求的细小颗粒则随气流被吸入转子

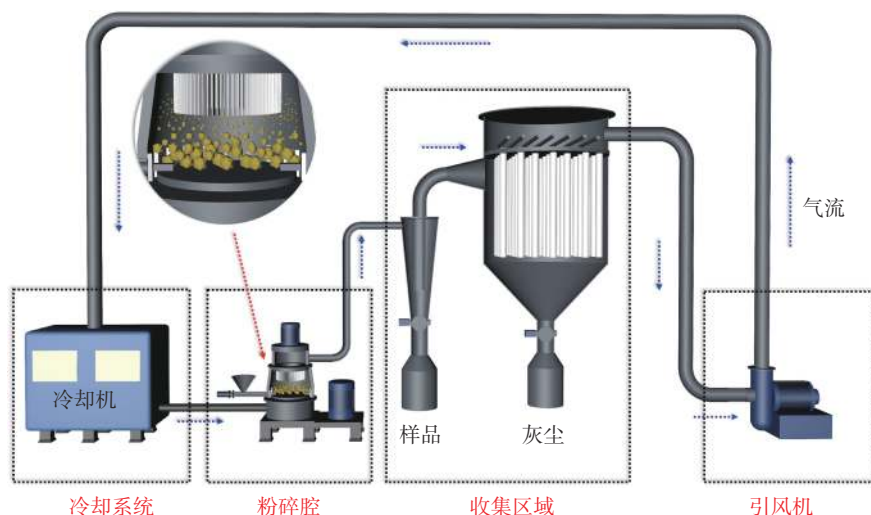


图 1 低温冲击磨设备原理图

Fig.1 Schematic diagram of low temperature impact milling

中心,有效避免了物料被过度粉碎。冷风机产生冷风并通过引风机输送至粉碎腔内,使整个粉碎过程的温度保持在 20 ℃ 以下,可有效避免热敏物质的损失。旋风分离器的出口处可以收集大部分物料,而非常小的颗粒则可能被筒式过滤器收集,从而避免粉尘污染。前期研究表明,相比于传统的粉碎方式,低温冲击磨更有利于改善糙米粉、紫玉米粉的理化性质^[12-13]。因此,对于稳定化处理后的大米抛光粉,采用低温冲击磨进一步改善其风味及理化性质是可行的。

本研究以大米抛光粉为原料,通过双螺杆挤压对其稳定化处理,探究不同挤压温度对大米抛光粉储藏稳定性及营养性质的影响。此外,基于最佳挤压温度下获得的大米抛光粉,以传统的锤式粉碎机作对比,探究低温冲击磨空气分级机不同转速对其香气物质及理化性质的影响。研究结果以期对大米抛光粉工业化高价值利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新鲜大米抛光粉(淀粉 54.91%、蛋白质 13.09%、脂肪 13.08%、膳食纤维 5.31%、水分 9.70%、灰分 3.04%) 中国江西宝兴米业有限公司;K-TSTA 总淀粉测定试剂盒 爱尔兰 Megazyme 试剂有限公司; γ -氨基丁酸、 γ -谷维素、邻二氯苯标准品、正构烷烃 $C_7\sim C_{30}$ Sigma 试剂有限公司;PBS 缓冲液、次氯酸钠溶液 上海麦克林生化科技有限公司;所有化学产品和溶剂均为分析级。

FMHE36-24 双螺杆挤压机 湖南福马食品工程科技有限公司;9FQ50-40 传统锤式粉碎机 江西红星机械有限公司;LNIST-66A 低温冲击磨 北京协同创新研究院;SZC-101 全自动索氏脂肪提取测定仪 上海力晶科学仪器有限公司;HH-6 数显恒温水浴锅 常州聚辉仪器制造有限公司;PRX-250 恒温恒湿培养箱 江苏新春兰科学仪器有限公司;NDK200-2N 氮吹仪 杭州米欧仪器有限公司;Agilent 7890 气相色谱-Agilent 5975C 质谱仪 美国安捷伦科技公司;MAZ-3000 型激光粒度分析仪 英国马尔文有限公司;CM-5 便携式色度计 日本柯尼卡美能达公司;Quanta200F 场发射扫描电子显微镜 德国卡塞尔公司;Nicolet-5700 傅里叶变换红外光谱仪 美国 Thermo 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 双螺杆挤压稳定化处理大米抛光粉 挤压试验根据曹亚文^[14]的方法进行,并稍作修改。以新鲜大米抛光粉为原料,采用双螺杆挤压机对其稳定化处理,挤压参数如下:挤压转速 200 r/min,水分含量 23%,保持 1~4 区温度分别为 70、90、100、110 ℃,依次设置第 5 区温度为 120、130、140、150、160 ℃,得到不同挤压温度下的样品,分别记为 ER-120、ER-130、ER-140、ER-150、ER-160。未经处理的新鲜大

米抛光粉作为对照组,记为 ER。所有样品使用 9FQ50-40 传统锤式粉碎机进行粉碎,过 80 目筛,装入密封自封袋,放至干燥器中待用。所得样品用于脂肪酶活性、脂肪酸值及营养性质的测定。

1.2.2 低温冲击磨超细化处理大米抛光粉 以 1.2.1 中挤压温度为 150 ℃ 条件下获得的大米抛光粉为原料,利用低温冲击磨(LTIM)制备不同粒径的大米抛光粉,设备参数根据郭晓娟^[15]的方法设置。主机磨盘转速和引风机转速分别设置为 2160 r/min 和 1740 r/min,空气分级机转速设置为 300、600、1200、1800 r/min,得到不同空气分级机转速下的样品,分别记为 SR-1、SR-2、SR-3、SR-4。粉碎腔内温度由冷风机实时控制,保持温度在 18 ℃。未经低温冲击磨处理的样品作为对照组,记为 SR。所得样品用于挥发性香气化合物及理化性质的测定。

1.2.3 储藏稳定性的测定

1.2.3.1 脂肪酶活的测定 根据 GB/T5523-2008 测定 1.2.1 挤压处理前后大米抛光粉样品的脂肪酶活。

1.2.3.2 储藏试验及脂肪酸值的测定 将 ER、ER-120、ER-130、ER-140、ER-150 和 ER-160 样品水分干燥至 10% 以下,放入温度为 25 ℃,相对湿度为 70% 的恒温恒湿培养箱,储藏 5 个月,每 30 d 取样,根据 GB/T 15684-2015 测定 1.2.1 挤压处理前后大米抛光粉样品的脂肪酸值^[16]。

1.2.4 营养性质的测定

1.2.4.1 基本成分的测定 根据 GB 5009.3-2016 的直接干燥法测定水分含量;根据 GB 5009.4-2016 的第一法(食品中总灰分的测定)测定灰分含量;根据 GB 5009.5-2016 的凯氏定氮法测定蛋白质含量;根据 GB 5009.6-2016 的索氏抽提法测定脂肪含量;根据总淀粉测定试剂盒测定总淀粉含量。

1.2.4.2 γ -氨基丁酸含量的测定 根据刘颖等^[17]的方法稍作修改,测定样品中 γ -氨基丁酸含量。称取 4.0 g 大米抛光粉,加入 10 mL 蒸馏水,充分研磨成浆糊状,再加入 15 mL 蒸馏水,30 ℃ 振荡提取 2 h。随后,4800 r/min 条件下离心 10 min,取上清液过 0.22 μ m 滤膜,得到 γ -氨基丁酸提取液,用蒸馏水定容至 10 mL。取 0.5 mL 提取液加入 10 mL 的比色管中,依次加入 0.2 mL 的 0.2 mol/L PBS 缓冲液、1.0 mL 的 6% 重蒸苯酚和 0.3 mL 的有效氯 6.5% 次氯酸钠溶液,混合均匀之后,沸水浴 10 min,立即冰浴 20 min 并不断振荡,待溶液从现蓝绿色后,再加 2.0 mL 的 60% 乙醇溶液,振荡均匀。静置 40 min 后,采用紫外分光光度计,于波长 645 nm 处测定吸光值。以 γ -氨基丁酸标准品绘制标准曲线,计算样品中 γ -氨基丁酸含量。

1.2.4.3 γ -谷维素含量的测定 根据 Srisaipet 等^[18]的方法稍作修改,测定样品中 γ -谷维素含量。称取 1.0 g 大米抛光粉,烘箱 105 ℃ 干燥至恒重,随后与

10 mL 正庚烷混合,室温下磁力搅拌 12 h, 4800 r/min 离心 10 min 后收集上清液。上清液经氮吹仪吹干,用正庚烷定容于 10 mL 容量瓶中。测定时取 5 mL 提取液加入 10 mL 比色管中,用正庚烷定容至 10 mL 刻度线处,采用紫外分光光度计,于波长 313 nm 处测定吸光值。以 γ -谷维素标准品绘制标准曲线,计算样品中 γ -谷维素含量。

1.2.4.4 膳食纤维的测定 根据 GB5009.88-2014 测定膳食纤维含量。

1.2.4.5 气相色谱-质谱(GC-MS)分析 挥发性香气化合物提取及 GC-MS 条件:挥发性香气化合物提取过程根据 Li 等^[19]的方法进行,并稍作修改。称取 0.5 g 样品与 5.0 mL 饱和氯化钠溶液在密封的 20 mL 顶空萃取瓶中充分混合,加入 15 μ L 邻二氯苯标准品(内标品),于 50 $^{\circ}$ C, 300 r/min 条件下,连续搅拌 20 min。随后,将 PDMS/DVB/CAR 固相微萃取头垂直插入顶空萃取瓶中,提取 30 min。最后,提取物以 1:1 的分流比注入气相色谱仪的进气口,解吸 5 min。GC-MS 条件:色谱柱使用 DB-Wax(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μ m);载气为氦气,流速保持恒定 1.0 mL/min;柱箱升温程序为起始温度 40 $^{\circ}$ C,以 2 $^{\circ}$ C/min 升至 60 $^{\circ}$ C,再以 4 $^{\circ}$ C/min 升至 140 $^{\circ}$ C,保持 2 min,最后以 10 $^{\circ}$ C/min 升至 250 $^{\circ}$ C。质谱条件:EI 电离源,能量 70 eV,倍增电压 1400 V;离子源温度 230 $^{\circ}$ C,接口温度 250 $^{\circ}$ C,四极杆温度 150 $^{\circ}$ C;扫描范围 30~550 m/z,间隔 0.3 s。

挥发性香气化合物鉴定及定量:基于质谱裂解模式和线性保留指数(LRI),鉴定挥发性香气化合物。质谱与 NIST14 库中可用的质谱数据进行比较;在相同仪器条件下,以正构烷烃 C_7 ~ C_{30} 为标准测定 LRI 值。挥发性香气化合物的浓度由式(1)计算:

$$\text{浓度}(\mu\text{g/kg}) = (A_s/A_i) \times 20 \quad \text{式 (1)}$$

式中, A_s 为鉴定出的挥发性化合物峰面积, A_i 为内标品峰面积。

1.2.5 理化性质的测定

1.2.5.1 粒径及比表面积的测定 采用激光粒度分析仪测定粒径及粒径分布,以去离子水为分散介质。具体参数设定如下:颗粒类型为非球体,遮光度为 10%~20%,分散剂折射率为 1.33,搅拌速率为 2200 r/min,超声功率为 50%,背景测定时间 10 s,样品测定时间 10 s。以体积平均粒径 $D[4,3]$ 评估样品的粒径, $D[4,3]$ 值及比表面积由 Mastersizer 软件(版本 3.50,英国马尔文有限公司)计算得出。

1.2.5.2 体积密度的测定 体积密度根据 Bai 等^[20]的方法进行测定。将样品慢慢倒入已知重量的 5 mL 量筒(M_1)中,期间不晃动量筒,当样品填充到量筒的标记处时,记录下样品和量筒的重量(M_2)。体积密度(g/mL)由式(2)计算:

$$\text{体积密度}(\text{g/mL}) = \frac{M_2 - M_1}{5} \quad \text{式 (2)}$$

式中, M_1 为量筒的重量, g; M_2 为样品及量筒的总重量, g。

1.2.5.3 色差的测定 采用便携式色度计测定样品的色泽相关参数。将样品铺满在干净的玻璃皿中,将玻璃皿放入色度计中直接读取参数,记录下亮度 L^* 、红度 a^* 和黄度 b^* 。白度指数反映了样品的整体白度^[21],由式(3)计算:

$$\text{白度指数} = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2} \quad \text{式 (3)}$$

1.2.5.4 吸水性和溶解性的测定 吸水性和溶解性根据 Lee 等^[22]的方法进行测定,并稍作修改。取 3.0 g 样品于 50 mL 离心管中,加入 35 mL 蒸馏水, 30 $^{\circ}$ C 下搅拌 40 min。得到的悬浮液在 4800 r/min 的转速下离心 30 min。随后,将上清液转移到已知重量的干蒸发皿中,同时称重沉淀物。将蒸发皿放入 105 $^{\circ}$ C 烘箱,蒸发完上清液后,测定剩余干固体的重量。吸水性定义为每克样品的吸水量,溶解性定义为上清液中含有的干固体重量相对于原始样品重量的百分比。

1.2.5.5 扫描电子显微镜分析 取少量样品于双面导电胶上,用离子溅射仪在样品上喷金 1 min,形成导电层,然后置于电子扫描显微镜中观察样品的形貌,在加速电压为 5.0 kV 的条件下,100 倍放大倍数下进行拍照观察。

1.2.5.6 傅里叶变换红外光谱分析 称取约 2 mg 样品和 140 mg 干燥的溴化钾置于玛瑙研钵中混合研磨均匀,随后压制成片。采用傅里叶红外光谱仪测定波数范围 4000~500 cm^{-1} 内的吸收光谱,分辨率 4 cm^{-1} ,扫描次数 32 次。红外吸收曲线用 OMNIC 8.0 软件进行分析。

1.3 数据处理

所有试验平行进行 3 次,实验结果以平均数 $\pm$ 标准差表示,采用 SPSS Statistics 25 软件进行单因素方差分析,并基于 Duncan 检验开展显著性比较($P < 0.05$)。此外,使用 SIMCA 14.1 软件(Umetrics, 瑞典)进行偏最小二乘判别分析,计算预测变量重要性投影(variable importance in projection, VIP),并结合 SPSS Statistics 25 软件进行单因素分析,以 $P < 0.05$ 及 $VIP \geq 1$ 为条件筛选差异挥发性香气化合物。

2 结果与分析

2.1 双螺杆挤压对大米抛光粉储藏稳定性的影响

如图 2 所示,ER 样品的脂肪酶活性为 12.94 mg/g,随着挤压温度的升高,脂肪酶活性呈逐渐降低的趋势,120~150 $^{\circ}$ C 温度区间内,脂肪酶活性从 7.27 mg/g 显著降低至 2.44 mg/g,而挤压温度继续升至 160 $^{\circ}$ C,样品中脂肪酶活性没有显著性变化($P > 0.05$)。这可能是由于热处理挤压区产生的高温、高压及高剪切力的协同作用,对脂肪酶活性有较强的抑制作用,但

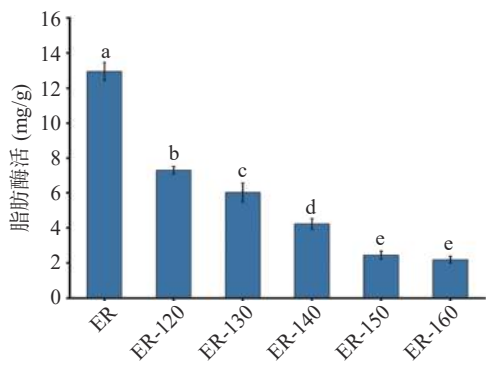


图2 不同挤压温度下大米抛光粉脂肪酶活

Fig.2 Lipase activity of rice polishing powder under different extrusion temperatures

注: 不同字母表示数据间的显著性差异($P < 0.05$); 图4~图7同。

部分耐热性脂肪酶类难以钝化, 继续升高挤压温度对脂肪酶活性抑制效果并不明显^[23-24]。脂肪酶活性变化趋势与胡迪^[24]的研究一致, 随着过热蒸汽处理温度从 120 ℃ 升高至 150 ℃, 米糠中脂肪酶活性从 12.38 mg/g 逐渐降低至 7.70 mg/g, 但继续升高温度至 160 ℃, 脂肪酶活性没有显著性变化。

如表1所示, 所有样品的初始脂肪酸值差异不大, 在 17~18 mg KOH/100 g 范围内。在 150 d 的储藏期内, 经挤压处理后样品的脂肪酸值始终远远低于对照样品, 且 ER 样品以非常快的速率上升到 255.57 mg KOH/100 g, 而经过挤压处理后的样品, 脂肪酸值上升速率较为缓慢。第 150 d 时, ER-150 和 ER-160 样品的脂肪酸值相对较低, 仅为 126.67 mg

KOH/100 g 和 121.90 mg KOH/100 g。这可能是由于 ER 样品中脂肪酶活性较高, 催化脂肪水解生成游离脂肪酸速度较快, 而挤压后的样品(尤其是 ER-150 和 ER-160)中脂肪酶活性较低, 从而导致较低的脂肪酸值^[25]。研究结果与吴建永^[26]报道的一致, 未经处理的轻碾米初始脂肪酸值为 17.00 mg KOH/100 g, 在 180 d 的储藏期内, 脂肪酸值以较快速率上升至 356.00 mg KOH/100 g, 而经过热蒸汽钝酶处理后的样品第 180 d 的脂肪酸值仅为 150.00 mg KOH/100 g。

2.2 双螺杆挤压对大米抛光粉营养性质的影响

如表2所示, ER 样品中淀粉、蛋白质、脂肪、膳食纤维、水分和灰分含量分别为 54.91、13.09、13.07、5.31、9.70 和 3.04 g/100 g。经挤压处理后, 淀粉和蛋白质含量略有下降, 这可能是由于物料在高温、高压及高剪切力的共同作用下, 蛋白质部分变性降解产生小分子肽和氨基酸; 淀粉发生糊化并降解生成小分子的还原糖与糊精^[27]。研究结果与王霞等^[27]报道的一致, 杂粮粉经挤压处理后淀粉和蛋白质含量分别从 52.59 g/100 g 和 22.06 g/100 g 显著降低至 49.97 g/100 g 和 19.23 g/100 g。脂肪、膳食纤维及灰分含量没有显著变化($P > 0.05$)。此外, ER 样品中 γ -氨基丁酸含量为 30.55 mg/100 g, 随着挤压温度的升高, γ -氨基丁酸含量先保持不变, 后显著升高, 相比于 ER 样品, ER-150 和 ER-160 样品分别显著增加了 6.15 mg/100 g 和 8.67 mg/100 g ($P < 0.05$),

表1 不同挤压温度下大米抛光粉在 150 d 内脂肪酸值的变化(mg KOH/100 g)

Table 1 Changes of fatty acid value of rice polishing powder under different extrusion temperatures in 150 days (mg KOH/100 g)

样品	储藏时间(d)					
	0	30	60	90	120	150
ER	17.66±0.07 ^a	162.22±1.17 ^a	193.79±1.19 ^a	205.31±1.18 ^a	238.56±1.05 ^a	255.57±1.33 ^a
ER-120	17.17±0.04 ^{bc}	50.62±0.17 ^{bc}	80.17±1.27 ^b	88.98±0.83 ^b	112.34±1.35 ^b	129.91±0.82 ^c
ER-130	17.35±0.11 ^b	51.31±0.21 ^b	77.37±0.73 ^c	84.89±0.69 ^c	111.18±1.42 ^b	129.81±0.62 ^c
ER-140	17.57±0.18 ^a	50.52±0.29 ^{bc}	72.63±0.85 ^d	78.65±0.35 ^d	104.80±0.95 ^c	131.49±0.37 ^b
ER-150	17.66±0.08 ^a	50.43±0.28 ^{bc}	67.42±1.37 ^e	73.23±0.35 ^e	94.20±0.48 ^d	126.67±0.36 ^d
ER-160	17.15±0.10 ^c	49.64±0.24 ^c	68.33±0.36 ^e	72.38±0.60 ^e	92.48±0.35 ^d	121.90±0.34 ^e

注: 表中数据为平均值±标准差, 同一列不同字母表示数据间具有显著性($P < 0.05$)。

表2 不同挤压温度下大米抛光粉中营养成分含量

Table 2 Nutrient contents of rice polishing powder under different extrusion temperatures

营养成分	样品					
	ER	ER-120	ER-130	ER-140	ER-150	ER-160
淀粉(g/100 g)	54.91±0.28 ^a	53.64±0.10 ^b	53.57±0.04 ^b	53.72±0.02 ^b	53.79±0.04 ^b	53.84±0.04 ^b
蛋白质(g/100 g)	13.09±0.07 ^a	12.52±0.04 ^b	12.42±0.03 ^b	12.26±0.06 ^c	12.22±0.04 ^c	12.22±0.02 ^c
脂肪(g/100 g)	13.07±0.33 ^a	12.32±1.20 ^a	12.54±0.08 ^a	12.62±0.27 ^a	12.74±0.37 ^a	12.22±0.30 ^a
膳食纤维(g/100 g)	5.31±0.88 ^a	5.70±0.66 ^a	5.50±0.28 ^a	6.04±0.19 ^a	4.83±0.85 ^a	4.75±0.88 ^a
水分(g/100 g)	9.70±0.12 ^b	11.73±0.26 ^a	12.08±0.09 ^a	11.92±0.29 ^a	12.08±0.09 ^a	12.04±0.02 ^a
灰分(g/100 g)	3.04±0.04 ^a	2.94±0.10 ^a	3.12±0.01 ^a	2.96±0.16 ^a	3.05±0.01 ^a	3.07±0.05 ^a
γ -氨基丁酸(mg/100 g)	30.55±0.78 ^c	30.71±1.45 ^c	31.26±1.12 ^c	31.97±1.00 ^c	36.70±0.56 ^b	39.22±0.78 ^a
γ -谷维素(mg/100 g)	67.63±0.99 ^a	68.07±0.62 ^a	66.59±1.24 ^{ab}	66.58±0.99 ^{ab}	66.15±0.87 ^{ab}	64.39±0.86 ^b

注: 表中数据为平均值±标准差, 同一行不同字母表示数据间具有显著性($P < 0.05$)。

这主要是由于挤压过程中的高温、高压和高剪切力能破坏细胞壁中的纤维素或木质素,使其更易释放出来^[28]。研究结果与曹亚文^[14]报道的一致,与单一球磨相比,挤压温度 160 ℃ 预处理再球磨使米糠中 γ -氨基丁酸含量显著增加了 2.65 mg/100 g。ER 样品中 γ -谷维素含量为 67.63 mg/100 g,随着挤压温度升高,谷维素含量先保持不变后显著下降($P<0.05$),这主要是由于谷维素是一种相对耐热的抗氧化剂,在高温下可以保持一定的稳定性,但温度过高,仍然会导致谷维素有所损失^[29]。综上,挤压温度 150 ℃ 条件下获得的大米抛光粉储藏稳定性较好,且 γ -氨基丁酸、 γ -谷维素和膳食纤维均保留较好。

2.3 低温冲击磨对大米抛光粉香气物质的影响

表 3 为空气分级机不同转速下大米抛光粉中挥发性香气成分含量。共检测到了 22 种挥发性化合物,包括 9 种醛类、5 种烃类、3 种醇类、2 种杂环化合物、1 种酮类、1 种酯类和 1 种其他化合物。图 3A 为空气分级机不同转速下大米抛光粉中挥发

性香气成分的总浓度,相较于 SR 样品,SR-1、SR-2 和 SR-3 样品均有更高的挥发性香气化合物总浓度,且 SR-3 最高,而 SR-4 样品总浓度有所下降。结果表明,与传统粉碎方式相比,低温冲击磨更有利于大米抛光粉中香气物质的释放,并且空气分级机转速为 1200 r/min 最有利于挥发性香气物质的释放。

采用偏最小二乘判别分析法(PLS-DA)比较了空气分级机不同转速下大米抛光粉香气特性的差异。如图 3B 所示,不同象限能够很好地区分各个组别,表明样品间风味物质存在显著差异。在本模型中,通过拟合方程可以覆盖大多数不同空气分级机转速下的挥发性香气化合物,其中,自变量拟合系数 $R^2X(cum)=0.986$,因变量拟合系数 $R^2Y(cum)=0.942$,预测能力指标 $Q^2(cum)=0.938$ 。一般认为, Q^2 和 R^2 大于 0.5 且接近 1 结果是准确的^[30],因此,由 PLS-DA 分析方法所构建的 PLS-DA 模型准确性较高。此外,进行了位移测试以验证模型的可靠性及稳定性(图 3C),结果显示经过 200 次交叉验证后, Q^2 模型

表 3 空气分级机不同转速下大米抛光粉中挥发性香气成分含量
Table 3 Content of volatile aroma components of rice polishing powder under different air classifier speeds

序号	化合物	CAS	LRI	浓度 (μg/kg)					显著性	VIP值	气味描述
				SR	SR-1	SR-2	SR-3	SR-4			
醛类											
A1	正己醛	66-25-1	790	20.86±0.63 ^b	22.96±1.29 ^a	17.90±1.21 ^c	16.05±0.58 ^d	7.66±0.23 ^e	**	0.840	青草味
A2	庚醛	111-71-7	1280	2.62±0.15 ^a	1.59±0.25 ^b	—	—	—	**	0.965	脂肪、柑橘、腐臭味
A3	辛醛	124-13-0	1376	1.97±0.65 ^{ab}	2.64±0.75 ^a	1.55±0.70 ^b	1.77±0.09 ^{ab}	1.41±0.10 ^b	ns	0.734	柠檬、青草、脂肪味
A4	壬醛	124-19-6	1482	23.2±1.22 ^b	31.6±0.40 ^a	22.17±0.59 ^b	30.99±0.13 ^a	18.99±1.10 ^c	**	1.253	绿色、脂肪、柑橘味
A5	(E)-2-庚烯醛	18829-55-5	1296	2.43±0.35 ^b	1.92±0.09 ^c	1.49±0.32 ^c	2.53±0.18 ^b	5.02±0.32 ^a	**	1.190	脂肪味
A6	反式-2-壬烯醛	18829-56-6	1498	1.40±0.38 ^d	2.87±0.05 ^b	1.89±0.31 ^c	3.43±0.13 ^a	3.41±0.33 ^a	**	1.004	青草、黄瓜味
A7	呋喃甲醛	98-01-1	834	2.33±0.16 ^a	0.35±0.01 ^b	1.50±0.1 ^a	2.25±0.37 ^d	1.01±0.31 ^c	**	1.381	杏仁,焦糖味
A8	苯甲醛	100-52-7	1435	5.67±0.61 ^b	5.98±0.52 ^b	5.97±0.24 ^b	8.23±0.29 ^a	8.18±0.34 ^a	**	0.855	坚果味
A9	3,4,二甲基苯甲醛	5973-71-7	1692	0.47±0.08 ^c	0.81±0.04 ^b	0.38±0.04 ^c	1.48±0.34 ^a	1.78±0.16 ^a	**	1.005	面包、杏仁、甜味
烃类											
B1	十二烷	112-40-3	1400	9.41±0.89 ^a	2.67±0.07 ^b	1.32±0.18 ^c	—	—	**	0.968	
B2	1-辛烯,6-甲基-	13151-10-5	952	0.26±0.12 ^a	0.39±0.19 ^a	—	—	—	*	0.872	蘑菇味
B3	D-柠檬烯	5989-27-5	1204	—	29.66±1.54 ^b	14.72±0.62 ^c	85.31±1.82 ^a	9.36±0.18 ^d	**	1.354	柠檬、柑橘味
B4	苯并环丁烯	694-87-1	1220	3.17±0.58 ^a	2.46±0.38 ^b	1.55±0.17 ^c	1.40±0.22 ^c	0.44±0.1 ^d	**	0.786	
B5	对伞花烃	99-87-6	1252	—	1.27±0.07 ^a	0.76±0.23 ^b	0.30±0.26 ^c	—	**	1.134	柑橘味
醇类											
C1	正己醇	111-27-3	844	1.99±0.21 ^b	2.52±0.44 ^a	1.47±0.41 ^c	1.19±0.03 ^{cd}	0.89±0.06 ^d	**	0.728	树脂、花、清新味
C2	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	1380	7.81±0.85 ^a	4.58±0.7 ^{bc}	3.48±0.31 ^c	5.66±0.89 ^b	5.68±0.2 ^b	**	1.329	蘑菇味
C3	糠醇	98-00-0	893	0.55±0.13 ^{cd}	0.30±0.04 ^d	0.97±0.06 ^{bc}	2.06±0.74 ^a	1.39±0.15 ^b	**	0.916	烧焦、汗、花味
杂环化合物											
D1	2-戊基呋喃	3777-69-3	1352	5.44±0.38 ^b	11.27±1.44 ^a	1.88±0.08 ^c	5.72±0.09 ^b	2.43±0.16 ^c	**	1.120	甜、香、果味
D2	2,3-二氢苯并呋喃	496-16-2	1438	0.36±0.05 ^c	0.36±0.05 ^c	0.52±0.15 ^{bc}	0.66±0.14 ^{ab}	0.75±0.06 ^a	**	0.640	甜味
酮类											
E1	5-庚-2-酮,6-甲基-	110-93-0	1242	0.77±0.09 ^{ab}	0.94±0.17 ^a	0.70±0.09 ^{ab}	0.62±0.18 ^b	0.71±0.10 ^{ab}	ns	0.880	爆米花味
脂类											
F1	邻苯二甲酸二甲酯	131-11-3	2048	0.14±0.03 ^d	1.23±0.18 ^c	1.23±0.15 ^c	2.18±0.17 ^b	3.29±0.20 ^a	**	0.850	
其他											
G1	2-甲氧基-4-乙烯苯酚	7786-61-0	1864	1.05±0.12 ^c	1.21±0.17 ^c	1.61±0.22 ^b	1.97±0.31 ^a	2.10±0.10 ^a	**	0.670	花生、烘烤味

注:表中数据为平均值±标准差,同一行不同字母表示数据间具有显著性($P<0.05$);“—”表示未检出;“ns”表示没有显著性差异;“*”表示 $P<0.01$;“**”表示 $P<0.001$ 。

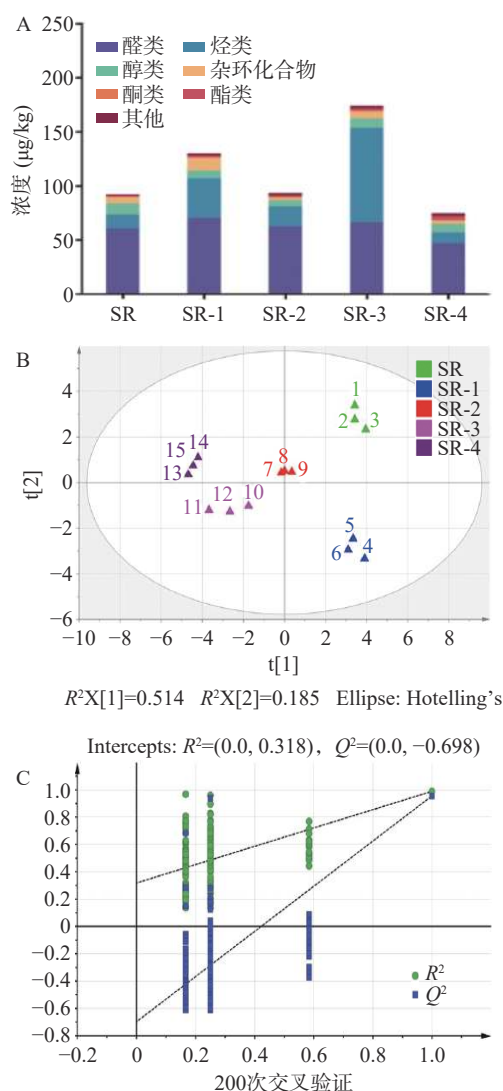


图3 空气分级机不同转速下大米抛光粉挥发性香气成分总浓度(A)、PLS-DA分析(B)和置换检验交叉验证(C)

Fig.3 Total concentration of volatile aroma compounds (A), PLS-DA analysis (B), and displacement test cross-validation (C) of rice polishing powder under different air classifier speeds

的回归线与横轴相交,且负截距为-0.698,所有替代测试的 R^2 和 Q^2 值均低于原始值,这表明所构建的 PLS-DA 模型是稳定且可靠的。此外,根据建立的 PLS-DA 模型,结合 $P < 0.05$ 及 $VIP \geq 1$,筛选出 9 个差异性标记物,包括呋喃甲醛、D-柠檬烯、1-辛烯-3-醇、辛醛、(E)-2-庚烯醛、对伞花烃、2-戊基呋喃、(E)-2-辛烯醛、3,4-二甲基苯甲醛。SR-3 样品中有 6 个差异性标记物的含量最高,包括呋喃甲醛(杏仁、焦糖味)、D-柠檬烯(柠檬、柑橘味)、辛醛(柠檬、青草、脂肪味)、2-戊基呋喃(甜、香、果味)、(E)-2-辛烯醛(黄瓜味)、3,4-二甲基苯甲醛(面包、杏仁、甜味),这使得 SR-3 具有最浓郁的香气。

2.4 低温冲击磨对大米抛光粉理化性质的影响

2.4.1 粒径及比表面积 如图 4A 所示,随着空气分级机转速的增加,D[4,3] 值呈逐渐下降的趋势。SR、SR-1、SR-2、SR-3 和 SR-4 样品的 D[4,3] 值分别为 114、90.2、33.1、20.6 和 15.4 μm,这表明随着空气分

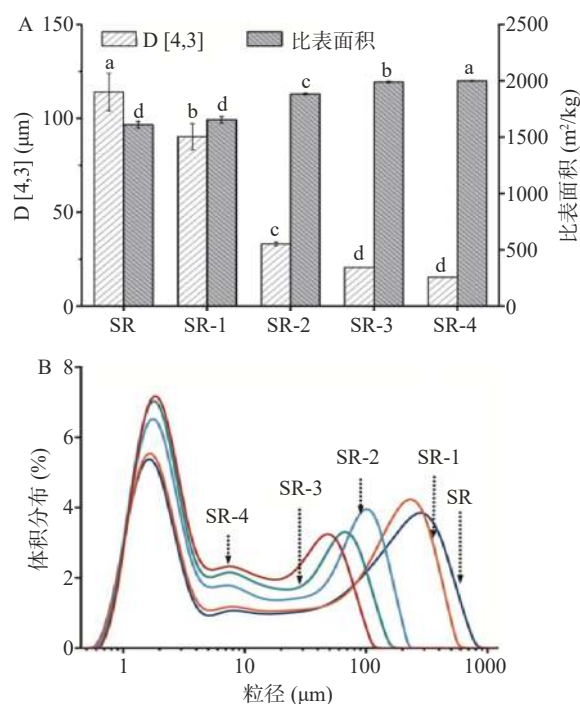


图4 空气分级机不同转速下大米抛光粉的 D[4,3] 及比表面积(A)和粒径分布图(B)

Fig.4 D[4,3] and specific surface area (A) and particle size distribution (B) of rice polishing powder under different air classifier speeds

级机转速的增加,粗颗粒逐渐被粉碎成细颗粒,导致粒径逐渐降低。图 4B 为样品的粒径分布曲线图,SR 样品的粒径范围大多分布在 100~1000 μm 区间,而随着空气分级机速度的增加,100~1000 μm 区间占比逐渐降低,1~10 μm 所占比逐渐增大,这进一步反映了样品中的大颗粒逐渐被粉碎成细颗粒。上述结果与课题组之前的研究结果一致,Luo 等^[31]报道随着空气分级机转速从 300 r/min 增加到 1800 r/min,糙米粉的 D[4,3] 值从 269 μm 显著降低至 32 μm。通常,粒径降低会导致比表面积的变化。如图 4A 所示,随着粒径的降低,大米抛光粉比表面积逐渐增加,SR-4 样品的比表面积最大,为 1999 m²/kg。总体而言,与传统粉碎方式相比,低温冲击磨对大米抛光粉的粉碎效果更好。

2.4.2 体积密度 如图 5 所示,SR 样品体积密度为 0.46×10^3 g/mL,随着空气分级机转速的增加,体积密

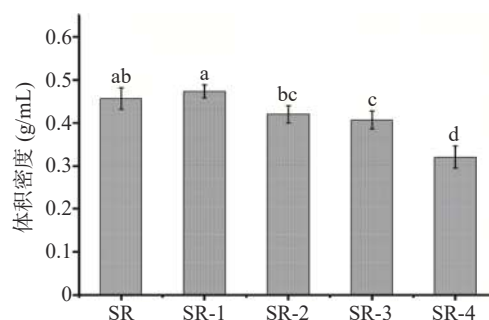


图5 空气分级机不同转速下大米抛光粉的体积密度

Fig.5 Bulk density of rice polishing powder under different air classifier speeds

度显著下降到 $0.32 \times 10^3 \text{ g/mL}$ (SR-4)。这主要是由于粒径降低,比表面积增大,颗粒间接触更为充分,堆积的更为致密,导致体积密度增大。然而,当颗粒粒径足够小时,颗粒间作用力占主导作用,这使得细颗粒之间容易聚集在一起,形成大而不规则的块状,导致孔隙空间显著增加,从而导致体积密度降低^[32]。体积密度的变化趋势与 Huang 等^[33]对辣木叶粉的研究结果一致,随着粉体粒径的减小,体积密度从 $0.47 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 显著下降到 $0.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

2.4.3 色差分析 谷物粉作为食品成分具有较高的 L^* 值和较低的 a^* 值,更易被消费者所接受^[34]。由图 6 可知,随着空气分级机转速的增加,大米抛光粉在宏观上呈现逐渐变白的趋势。白度指数代表了粉体的整体白度,SR 样品的白度指数由 66.08 显著增加至 76.61 (SR-4) ($P < 0.05$),这也表明了低温冲击磨使得大米抛光粉变得更白。此外,SR-4 具有最高的 L^* 值以及最低的 a^* 值和 b^* 值,说明 LTIM 增加了大米抛光粉的整体亮度,而降低了红度和黄度。这可能是由于粒径降低导致比表面积增大,导致粉体表面反射的光量更多,从而增加了亮度^[35]。这些结果与超微粉碎处理前后,小麦^[36]、黑麦和大麦^[37]的颜色变化一致。值得注意的是,通常粉体粒径越小,整体越白,但粒径并非样品白度的唯一影响因素,样品中营养组成对其白度也有影响^[12]。

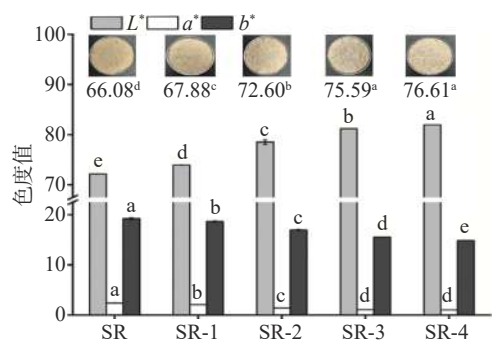


图 6 空气分级机不同转速下大米抛光粉色度值及宏观样貌

Fig.6 Chroma value and macroscopic appearance of rice polishing powder under different air classifier speeds

2.4.4 吸水性和溶解性 如图 7 所示,SR 样品的吸水性为 1.77 g/g,随着空气分级机转速的增加,SR-3 样品的吸水性显著增加到 2.42 g/g ($P < 0.05$),而 SR-3 与 SR-4 样品的吸水性没有显著性差异 ($P > 0.05$)。吸水性的增加可能是由于粒径降低,比表面积增加,

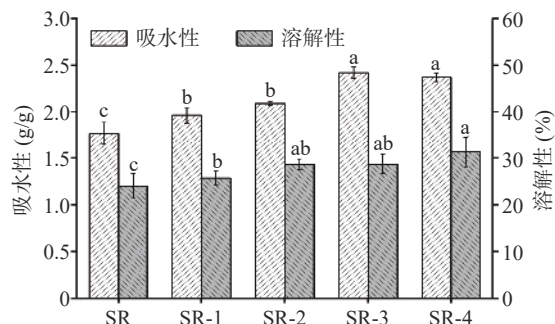


图 7 空气分级机不同转速下大米抛光粉吸水性和溶解性

Fig.7 Water absorption ability and solubility of rice polishing powder under different air classifier speeds

这使得颗粒可与水相互作用的位点数量增多,更易吸水^[38]。研究结果与 Drakos 等^[37]报道的一致,随着粒径的降低,黑麦和大麦的吸水能力分别从 1.20 g/g 和 0.95 g/g 显著增加到 1.49 g/g 和 1.23 g/g。

如图 7 所示,SR 样品的溶解性为 24%,随着空气分级机速度的增加,SR-4 样品的吸水性显著增加到 31% ($P < 0.05$)。这主要是由于在粉碎过程中强机械作用力破坏了淀粉颗粒中的氢键,从而导致游离羟基的增加,使得更多的水分子能够与淀粉分子中的游离羟基相互作用,提高其溶解性^[39],但也不能排除共价键的影响效果。研究结果与 Limpongsa 等^[39]报道的一致,大米淀粉经球磨处理后,溶解性从 6.0% 显著上升至 33.6%。总体而言,与传统的粉碎方式相比,低温冲击磨处理更有利于提升大米抛光粉的吸水性及溶解性。

2.4.5 微观结构 通过扫描电子显微镜观察了空气分级机不同转速下大米抛光粉的微观结构。如图 8 所示,SR、SR-1 和 SR-2 样品中的颗粒大多呈现分散的大单体块状,随着空气分级机转速的增加,SR-3 和 SR-4 样品中大多是分布均匀的细小颗粒,这与粒径及粒径分布结果一致。

2.4.6 傅里叶变换红外光谱 傅里叶变换红外光谱多被用于评估短程有序结构的变化。如图 9 所示,所有样品显示出类似的峰型,没有新的峰型产生或消失,这表明低温冲击磨处理对官能团没有影响。位于 $3600 \sim 3000 \text{ cm}^{-1}$ 的峰归因于羟基的复杂伸缩振动^[40]。相应的峰强度和峰波数分别与羟基的数量和氢键强度相关,较高的峰强度表示有更多的羟基,较高的峰波数表示羟基之间的关联度较低^[41]。与 SR

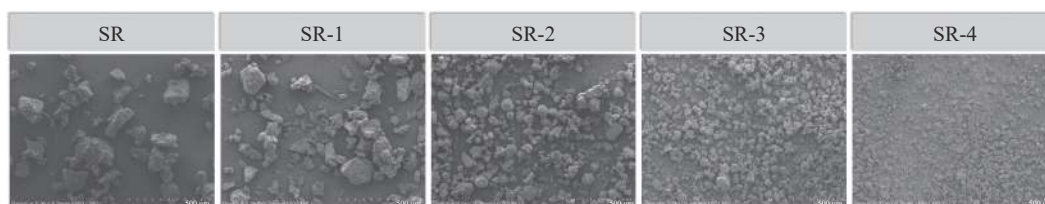


图 8 空气分级机不同转速下大米抛光粉微观结构(100×)

Fig.8 Microstructure of rice polishing powder under different air classifier speeds (100×)

样品相比,经低温冲击磨处理后的样品峰强度增强,且峰波数从 SR 样品的 3320 cm^{-1} 移动至 3381 cm^{-1} (SR-4),这表明低温冲击磨处理导致了淀粉分子间氢键的断裂,增加了更多暴露的羟基基团^[41]。此外, 1650 cm^{-1} 处的峰归因于酰胺 I 键的弯曲振动。经过低温冲击磨处理后,明显观察到 1650 cm^{-1} 处的峰强度增加,表明酰胺 I 键被暴露的更多,从而使其与水结合,分子作用力增强^[14]。上述结果解释了吸水性和溶解性的变化。

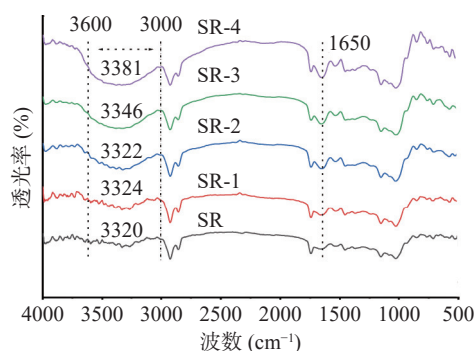


图9 空气分级机不同转速下大米抛光粉傅里叶变换红外光谱

Fig.9 Fourier transform infrared spectrum of rice polishing powder under different air classifier speeds

3 结论

本研究明晰了双螺杆挤压不同挤压温度对大米抛光粉储藏稳定性及营养性质的影响,并初步揭示了低温冲击磨改善大米抛光粉风味及理化性质的机制主要与粒径变化相关。本研究可为大米抛光粉工业化高价值利用提供理论基础。具体研究结果如下:双螺杆挤压可以显著降低大米抛光粉中脂肪酶活性,延长其货架期,并且 γ -氨基丁酸、 γ -谷维素及膳食纤维保留效果较好。结合稳定效果及营养物质保留效果综合考量,挤压温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为最佳条件。此条件下获得的大米抛光粉(SR),经低温冲击磨进一步处理,其风味及理化性质得到显著改善。与传统的粉碎方式相比,低温冲击磨更有利于促进大米抛光粉中挥发性香气化合物的释放,SR-3 样品中挥发性香气化合物总含量最高,风味最浓郁。理化性质方面,与传统的粉碎方式相比,低温冲击磨对大米抛光粉的粉碎效果更好。低温冲击磨空气分级机转速越高,大米抛光粉粒径越小,比表面积越大,体积密度越低,吸水性和溶解性越高,但 SR-3 与 SR-4 之间差异不显著。总的来说,双螺杆挤压温度 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和低温冲击磨空气分级机转速 1200 r/min 下获得的大米抛光粉品质最佳。然而,本研究未深入探究低温冲击磨对大米抛光粉的粉碎机理,如物料在粉碎腔内的实时粉碎状态及破碎方式,未来的研究可结合数值模拟等跨领域研究手段,明晰物料在设备中的粉碎机理,以期对粉碎设备的升级迭代(如改善腔体通道模型)和粉碎效率的提高提供理论依据。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] BHUNIA R K, SINHA K, KAUR R, et al. A holistic view of the genetic factors involved in triggering hydrolytic and oxidative rancidity of rice bran lipids[J]. *Food Reviews International*, 2023, 39(1): 441–466.
- [2] YILMAZ T N. Stabilization of rice bran: A review[J]. *Foods*, 2023, 12(9): 1924.
- [3] LIU Y Q, STRAPPE P, ZHOU Z K. Impact on the nutritional attributes of rice bran following various stabilization procedures[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(15): 2458–2466.
- [4] CHENG W W, GAO L, WU D, et al. Effect of improved extrusion cooking technology on structure, physiochemical and nutritional characteristics of physically modified buckwheat flour: Its potential use as food ingredients[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 133: 109872.
- [5] CAO Y W, ZHAO J W, JIN Z Y, et al. Improvement of rice bran modified by extrusion combined with ball milling on the quality of steamed brown rice cake[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 99: 103229.
- [6] ZHANG G P, XUAN Y, LYU F, et al. Microstructural, physicochemical properties and starch digestibility of brown rice flour treated with extrusion and heat moisture[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 124594.
- [7] GULZAR B, HUSSAIN S Z, NASEER B, et al. Enhancement of resistant starch content in modified rice flour using extrusion technology[J]. *Cereal Chemistry*, 2021, 98(3): 634–641.
- [8] ÖZDEMİR K S, YILMAZ C, DURMAZ G, et al. Hazelnut skin powder: A new brown colored functional ingredient[J]. *Food Research International*, 2014, 65: 291–297.
- [9] MENG Q R, FAN H R, XU D, et al. Superfine grinding improves the bioaccessibility and antioxidant properties of dendrobium officinale powders[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52(6): 1440–1451.
- [10] ZHAO X Y, SUN L, ZHANG X W, et al. Effects of ultrafine grinding time on the functional and flavor properties of soybean protein isolate[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2020, 196: 111345.
- [11] GAO W J, CHEN F, WANG X, et al. Recent advances in processing food powders by using superfine grinding techniques: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(4): 2222–2255.
- [12] 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.
- [13] GUO X J, HE X M, DAI T T, et al. The physicochemical and pasting properties of purple corn flour ground by a novel low temperature impact mill[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 74: 102825.
- [14] 曹亚文. 米糠的微细化、性质及其在糙米发糕中的应用[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [CAO Y W. The micronization and properties of rice bran and its application in steamed brown rice cake[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

- [15] 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. [GUO X J. Study on the pulverization and quality control mechanism of purple corn in low temperature impact mill[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.]
- [16] HE R, WANG Y J, ZOU Y C, et al. Storage characteristics of infrared radiation stabilized rice bran and its shelf-life evaluation by prediction modeling[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(6): 2638–2647.
- [17] 刘颖, 王子妍, 贾健辉, 等. 预处理-低温挤压对留胚米粉理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 201–206. [LIU Y, WANG Z Y, JIA J H, et al. Effect of pretreatment and low-temperature extrusion on the physicochemical properties of embryonic rice flour[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(12): 201–206.]
- [18] SRISAIPET A, NUDDAGUL M. Influence of temperature on gamma-oryzanol stability of edible rice bran oil during heating[J]. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 2014, 5(4): 303–306.
- [19] LI Y, GAO C, WANG Y, et al. Analysis of the aroma volatile compounds in different stabilized rice bran during storage[J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134753.
- [20] BAI Y X, LI Y F. Preparation and characterization of crosslinked porous cellulose beads[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 64(3): 402–407.
- [21] TONG L T, GAO X X, LIN L Z, et al. Effects of semidry flour milling on the quality attributes of rice flour and rice noodles in China[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 62: 45–49.
- [22] LEE Y T, SHIM M J, GOH H K, et al. Effect of jet milling on the physicochemical properties, pasting properties, and *in vitro* starch digestibility of germinated brown rice flour[J]. *Food Chemistry*, 2019, 282: 164–168.
- [23] RASHID M T, LIU K L, HAN S M, et al. Optimization of extrusion treatments, quality assessments, and kinetics degradation of enzyme activities during storage of rice bran[J]. *Foods*, 2023, 12(6): 1236.
- [24] 胡迪. 过热蒸汽对米糠营养、理化与储藏性质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2018. [HU D. Effects of superheated steam on nutrition, physicochemical, and storage properties of rice bran[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.]
- [25] 廖梅吉, 敬璞, 高霓思, 等. 热风辅助射频加热对米糠储藏稳定性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(3): 128–136. [LIAO M J, JING P, GAO N S, et al. Effect of hot air-assisted radio frequency heating on storage stability of rice bran[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils*, 2022, 37(3): 128–136.]
- [26] 吴建永. 过热蒸汽法制备轻碾营养米及其理化性质研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016. [WU J Y. Preparation of lightly milled rice by superheated steam and its physicochemical properties[D]. Nanchang: Nanchang University, 2016.]
- [27] 王霞, 刘永吉, 白吉敏, 等. 挤压膨化对杂粮代餐粉营养成分及理化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(22): 28–35. [WANG X, LIU Y J, BAI J M, et al. Effects of extrusion on nutritional quality and physicochemical properties of multigrain meal replacement powder[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(22): 28–35.]
- [28] QIAO H Z, SHAO H M, ZHENG X J, et al. Modification of sweet potato (*Ipomoea batatas* Lam.) residues soluble dietary fiber following twin-screw extrusion[J]. *Food Chemistry*, 2021, 335: 127522.
- [29] LAOKULDILOK T, RATTANATHANAN Y. Protease treatment for the stabilization of rice bran: Effects on lipase activity, antioxidants, and lipid stability[J]. *Cereal Chemistry*, 2014, 91(6): 560–565.
- [30] DOU X J, ZHANG L X, YANG R N, et al. Adulteration detection of essence in sesame oil based on headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. *Food Chemistry*, 2022, 370: 131373.
- [31] LUO S J, YAN X D, FU Y T, et al. The quality of gluten-free bread made of brown rice flour prepared by low temperature impact mill[J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 129032.
- [32] GAO X B, ZHU D H, LIU Y J, et al. Physicochemical properties and anthocyanin bioaccessibility of downy rose-myrtle powder prepared by superfine grinding[J]. *International Journal of Food Properties*, 2019, 22(1): 2022–2032.
- [33] HUANG X, LIANG K H, LIU Q, et al. Superfine grinding affects physicochemical, thermal and structural properties of *Moringa oleifera* leaf powders[J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 151: 112472.
- [34] SAUCEDO-POMPA S, TORRES-CASTILLO J A, CASTRO-LÓPEZ C, et al. *Moringa* plants: Bioactive compounds and promising applications in food products[J]. *Food Research International*, 2018, 111: 438–450.
- [35] AHMED J, THOMAS L, ARFAT Y A. Functional, rheological, microstructural and antioxidant properties of quinoa flour in dispersions as influenced by particle size[J]. *Food Research International*, 2019, 116: 302–311.
- [36] ANGELIDIS G, PROTONOTARIOU S, MANDALA I, et al. Jet milling effect on wheat flour characteristics and starch hydrolysis[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2016, 53(1): 784–791.
- [37] DRAKOS A, KYRIAKAKIS G, EVAGELIOU V, et al. Influence of jet milling and particle size on the composition, physicochemical and mechanical properties of barley and rye flours[J]. *Food Chemistry*, 2017, 215: 326–332.
- [38] KANG M J, KIM M J, KWAK H S, et al. Effects of milling methods and cultivars on physicochemical properties of whole-wheat flour[J]. *Journal of Food Quality*, 2019, 2019(1): 1–12.
- [39] LIMPONGSA E, JAIPAKDEE N. Physical modification of Thai rice starch and its application as orodispersible film former[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 239: 116206.
- [40] CAPRON I, ROBERT P, COLONNA P, et al. Starch in rubbery and glassy states by ftir spectroscopy[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2007, 68(2): 249–259.
- [41] ZHANG Z N, ZHANG M Q, ZHAO W. Effect of starch-protein interaction on regulating the digestibility of waxy rice starch under radio frequency treatment with added CaCl_2 [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 232: 123236.