

物料形态对稻米湿热处理改性效果的影响

汪浩彦¹ 冯 伟¹ 郑宇斌¹ 王 韧¹ 霍 坚²

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 2. 湖南聚宝金昊生物科技有限公司, 湖南 湘潭 411100)

摘要: [目的] 探明米粉和整米两种物料形态对稻米湿热处理改性效果及理化特性的影响。[方法] 以早籼米为原料, 在 3 个水分梯度 (21%, 24%, 27%) 下分别对米粉和整米进行湿热处理 (100 °C, 2 h), 随后对两组样品的基本化学成分、表面颗粒形貌、晶体结构特征、粉质加工特性等进行表征。[结果] 湿热处理后, 两组样品的颗粒分散性显著降低, 出现明显的聚集融合现象, 均保留着大米淀粉典型的 A 型结晶结构, 结晶度略有降低, 吸热峰右移, 热焓值 (ΔH) 下降, 峰值黏度、最终黏度、崩解值及回生值减小, 峰值时间滞后, 成糊温度增大, 淀粉热稳定性与抗回生能力增强; 水分含量显著影响样品的表面颗粒形貌、破损淀粉含量、结晶度和热力学特征, 但对糊化特性和凝胶质构的影响较小; 物料形态显著影响湿热改性的效果, 与米粉组相比, 整米组表现出更高的直链淀粉含量、破损淀粉含量、特征粒径值、凝胶硬度、咀嚼性和回复性, 以及略低的起始温度、峰值温度、 ΔH 值和崩解值。[结论] 物料形态显著影响稻米湿热改性效果。

关键词: 稻米; 米粉; 整米; 湿热处理; 粉质特性; 糊化特性

Effects of material form on the modification of rice by heat-moisture treatment

Wang Haoyan¹ Feng Wei¹ Zheng Yubin¹ Wang Ren¹ Huo Jian²

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Hunan Jubao Jinhao Biotechnology Co., Ltd., Xiangtan, Hunan 411100, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of two material forms (rice flour and whole rice grains) on the modification performance of rice by heat-moisture treatment and physicochemical properties. [Methods] Early *indica* rice is used as raw material. Rice flour and whole rice grains are subjected to heat-moisture treatment (100 °C, 2 h) under three moisture levels (21%, 24%, and 27%). Subsequently, the basic chemical composition, surface particle morphology, crystal structure characteristics, and farinograph processing properties of samples from the two groups are characterized. [Results] After heat-moisture treatment, the particle dispersibility of samples in both groups decreases significantly, accompanied by obvious aggregation and fusion. All the samples maintain the typical A-type crystal structure of rice starch, with a slight reduction in crystallinity, a shift of endothermic peak toward higher temperature, and a decline in enthalpy (ΔH). After treatment, the samples exhibit decreased peak viscosity, final viscosity, breakdown and setback values, delayed occurrence of peak time, and increased gelatinization temperatures. Meanwhile, the thermal stability and anti-retrogradation capacity of starch are improved. Moisture content exerts remarkable influences on surface particle morphology, damaged starch content, crystallinity, and thermodynamic characteristics of samples, whereas its effects on gelatinization properties and gel texture are weak. Material form significantly affects the modification performance of heat-moisture treatment. Compared with the rice flour group, the whole rice grain group exhibits increased amylose content, damaged starch content, characteristic particle size, gel hardness, chewiness, and resilience, as well as slightly declined starting temperature, peak temperature, ΔH , and breakdown value. [Conclusion] Material form significantly affects the modification performance of heat-moisture treatment on rice.

基金项目: 十四五国家重点研发计划项目 (编号: 2023YFD2100803)

通信作者: 冯伟 (1983—), 男, 江南大学副研究员, 博士。E-mail: jifengwei@jiangnan.edu.cn

收稿日期: 2026-01-13 改回日期: 2026-07-14

引用格式: 汪浩彦, 冯伟, 郑宇斌, 等. 物料形态对稻米湿热处理改性效果的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(8): 18-25.

Citation: Wang Haoyan, Feng Wei, Zheng Yubin, et al. Effects of material form on the modification of rice by heat-moisture treatment[J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 18-25.

Keywords: rice; rice flour; whole rice grain; heat-moisture treatment; flour property; gelatinization property

米粉作为米制品加工中的过渡产品,其粉质特性决定了产品的质构和食味品质。目前,中国的米粉加工,尤其是籼米粉和粳米粉加工,仍以简单的粉碎处理为主,存在技术集成度低、粉质调控手段匮乏等问题,导致米粉的粉质加工特性严重依赖大米品种。中国水稻品种众多,不同地域间种植品种差异巨大,极大限制了中国米制品行业的标准化和规模化发展。从粉体颗粒形貌、组分分布、晶体结构等角度出发,探索具有产业化应用潜力的粉质调控技术,已成为当前的研究热点之一。湿热处理是一种仅利用水与热作为介质的物理改性方法,因其操作安全、无化学残留而被广泛应用于谷物及淀粉的改性^[1-2]。该技术可促使淀粉分子链发生重排,从而优化其功能性质,如提高糊化温度、降低黏度、增强热稳定性及延缓老化等^[3-4],有助于改善淀粉的加工适应性与终产品品质。

目前,相关研究多集中于湿热处理对淀粉或米粉的影响,涉及颗粒形态、晶体结构、热力学及糊化等多方面性质。Majzoobi等^[5]研究表明,稳态温度场处理可降低米粉的溶解度,并提高米粉凝胶的硬度和弹性。唐玮泽^[6]也发现,经过稳态温度场循环处理后,早籼米粉的溶解度和膨润力显著下降,淀粉结晶结构有序度增加,其制作的米线具有更低的蒸煮损失率、断条率和更好的质构特性及感官评分。Arns等^[7]研究发现,湿热处理可提高糊化温度,降低回生值与黏度,并增强热稳定性。但针对米粉与整米两种不同物料形态下湿热改性效果的对比研究,目前尚未见报道。

试验拟以早籼米为研究对象,分别在米粉和整米两种物料形态下对其进行湿热处理,系统比较湿热改性后两组样品在化学组成、颗粒形貌、晶体结构和粉质特性上的差异,进而阐明物料形态对湿热改性效果的影响,以期对籼米粉的粉质调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

早籼米:湖南聚宝金昊生物科技有限公司;

α -淀粉酶:酶活 10 U/mg,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;

其余试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

快速黏度分析仪:RVA 4500 型,澳大利亚波通公司;

差示扫描量热仪:DSC 3 型,瑞士梅特勒—托利多公司;

X射线衍射仪:D8 型,德国布鲁克 AXS 有限公司;

质构分析仪:TA-XT plus 型,英国 Stable Micro System 公司;

激光粒度分布仪:BT-9300S 型,丹东百特仪器有限公司;

扫描电子显微镜:SU8100 型,日本株式会社日立高新技术公司;

紫外分光光度计:UV-3200 型,上海美谱达仪器有限公司;

数显鼓风干燥箱:GZX-9246 MBE 型,上海博讯医疗设备厂;

电子天平:PL2002 型,瑞士梅特勒—托利多公司;

万能粉碎机:20-B 型,江阴市杰顺机械有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品湿热处理

(1) 米粉样品湿热处理:参照宋昕等^[8]的方法将早籼米制成米粉。准确称取一定量的米粉,根据设置的目标水分含量(21%, 24%, 27%)精准计算并喷洒加入所需蒸馏水,充分搅拌均匀后将样品用自封袋密封,4℃静置 24 h。水分平衡后,将样品转入真空包装袋并抽真空密封,于 100℃烘箱中湿热处理 2 h,冷却后于 45℃干燥至水分含量约为 10%,过 100 目筛,得湿热处理的米粉样品,根据湿热处理时的水分含量分别命名为 F-21%、F-24% 和 F-27%。对照样品为未经湿热处理的米粉,命名为对照样 1。

(2) 整米样品湿热处理:准确称取一定量的早籼米,采用与米粉样品相同的方式调节水分并进行湿热处理,湿热处理样品经齿爪式粉碎机粉碎、100 目筛筛分后,45℃干燥至水分含量约为 10%,过 100 目筛,得湿热处理的整米米粉样品,根据湿热处理时的水分含量分别命名为 R-21%、R-24% 和 R-27%。对照样品为早籼米直接经齿爪式粉碎机粉碎并过 100 目筛的米粉,命名为对照样 2。

1.3.2 基本化学成分测定

(1) 水分含量:参照 GB 5009.3—2016。

(2) 蛋白含量:参照 GB 5009.5—2016。

(3) 脂肪含量:参照 GB 5009.6—2016。

(4) 灰分含量:参照 GB 5009.4—2016。

(5) 直链淀粉含量:参照 GB/T 15683—2025。

1.3.3 颗粒形貌表征(SEM) 采用扫描电子显微镜观察不同米粉样品的形态特征。将米粉样品均匀分散至导电胶上,然后进行喷金处理,加速电压为 3.0 kV,拍摄倍数为 2 000 倍。

1.3.4 粒径分布和破损淀粉含量测定 取米粉样品,用去离子水配成质量分数为 10% 的溶液,加入到激光粒度分布仪中,折射率为 10%~15%,采用连续测试模式测定淀粉粒径。参照 GB/T 9826—2008 测定破损淀粉率。

1.3.5 晶体结构特征测定 参照李梦锦等^[9]的方法并修

改。对米粉样品进行 X 射线衍射分析。测定参数:管压 40 kV,管流 30 mA,扫描范围 (2θ) $5^{\circ}\sim 40^{\circ}$,扫描速率 $5(^{\circ})/\text{min}$,步长 0.02° 。利用 Jade 6.0 软件计算相对结晶度。

1.3.6 热力学特性测定 参照汤佳媛等^[10]的方法并修改。称取 3.0 mg 样品于坩埚中,加入两倍样品质量的蒸馏水, 4°C 密封静置 12 h。载气为氮气,流速 50 mL/min,空坩埚作为对照。程序设置:起始温度 30°C ,升温速度 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$,终止温度 110°C 。

1.3.7 糊化特性(RVA)测定 参照曹怡君等^[11]的方法。以水分基为 14% 计,准确称取 3 g 米粉样品和 25 mL 去离子水,在 RVA 铝罐中混匀 30 s,立刻将淀粉悬浮液放入仪器中。测试条件:起始温度 50°C ,维持 1 min,以 $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升温至 95°C ,维持 2.5 min,以 $12^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 降温至 50°C ,维持 2 min,总时间 13 min。前 10 s 搅拌桨转速为 960 r/min,后续时间转速为 160 r/min。

1.3.8 质构特征测定 参照曹怡君等^[11]的方法。将 RVA 制备的米粉糊倒入 35 mL 塑料圆台型取样盒中, 4°C 密封静置 12 h,使其形成质地均一的固态凝胶状米粉凝块,倒出并采用质构仪测定其质构特性。选用 P/25 探头,测前

速度 2 mm/s,测试、后速度 1 mm/s,压缩比 50%,压缩时间 5 s。

1.3.9 数据统计与分析 所有试验均重复 3 次,使用 Origin 2024 软件进行数据处理,并以“均值 $\pm$ 标准差”表示。采用 SPSS 26.0 统计软件进行单因素方差分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 基本化学成分

由表 1 可知,米粉组的蛋白、脂肪和直链淀粉含量均略低于整米组,主要因为米粉组样品在湿热处理前经过了浸泡和半干粉碎等工序,浸泡过程会造成部分蛋白质、脂肪和可溶性物质流失^[12]。此外,湿热处理后米粉组的表观直链淀粉含量略有降低,与 Bian 等^[13]的研究结果相似。Chung 等^[14]也发现,湿热改性后普通玉米淀粉的表观直链淀粉含量降低,且双重湿热改性的降幅要大于单重。由于表观直链淀粉含量受直链淀粉与碘结合能力的影响,因此 Lan 等^[15]推测湿热处理造成直链淀粉螺旋结构的变化进而导致其与碘结合能力下降。在湿热处理的整米组中,表观直链淀粉含量的降幅不显著,说明物料形态的差异也可能会影响湿热处理的改性效果。

表 1 米粉和整米经湿热处理后样品的基本化学成分[†]

Table 1 Basic chemical composition of rice flour and whole rice grain samples subjected to heat-moisture treatment %					
样品	水分	蛋白	脂肪	灰分	直链淀粉
对照样 1	$6.81\pm 0.09^{\text{e}}$	$8.16\pm 0.46^{\text{ab}}$	$0.54\pm 0.01^{\text{e}}$	$0.73\pm 0.03^{\text{bc}}$	$17.87\pm 0.49^{\text{b}}$
F-21%	$8.90\pm 0.07^{\text{b}}$	$7.85\pm 0.12^{\text{b}}$	$0.56\pm 0.02^{\text{e}}$	$0.60\pm 0.02^{\text{e}}$	$15.11\pm 0.05^{\text{d}}$
F-24%	$7.95\pm 0.20^{\text{c}}$	$8.03\pm 0.07^{\text{ab}}$	$0.53\pm 0.01^{\text{e}}$	$0.59\pm 0.09^{\text{e}}$	$16.27\pm 0.34^{\text{c}}$
F-27%	$7.70\pm 0.04^{\text{cd}}$	$8.04\pm 0.13^{\text{ab}}$	$0.46\pm 0.02^{\text{e}}$	$0.56\pm 0.08^{\text{e}}$	$14.86\pm 0.00^{\text{d}}$
对照样 2	$9.89\pm 0.43^{\text{a}}$	$8.72\pm 0.04^{\text{a}}$	$1.41\pm 0.08^{\text{a}}$	$1.17\pm 0.07^{\text{a}}$	$19.38\pm 0.05^{\text{a}}$
R-21%	$7.34\pm 0.18^{\text{de}}$	$8.67\pm 0.26^{\text{a}}$	$0.95\pm 0.07^{\text{b}}$	$0.74\pm 0.00^{\text{bc}}$	$18.84\pm 0.10^{\text{ab}}$
R-24%	$7.22\pm 0.16^{\text{de}}$	$8.49\pm 0.15^{\text{ab}}$	$1.03\pm 0.05^{\text{b}}$	$0.76\pm 0.11^{\text{bc}}$	$18.70\pm 0.53^{\text{ab}}$
R-27%	$7.09\pm 0.19^{\text{de}}$	$8.65\pm 0.22^{\text{a}}$	$1.04\pm 0.08^{\text{b}}$	$0.58\pm 0.05^{\text{c}}$	$19.14\pm 0.29^{\text{a}}$

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 颗粒形貌(SEM)

由图 1 可知,对照样 1 中可观察到呈不规则多角形的天然大米淀粉颗粒及其团聚物,且颗粒表面较为光滑圆润;与对照样 1 相比,对照样 2 中的单体淀粉颗粒数量明显减少,且颗粒表面更为粗糙、光泽度较差,二者分别呈现出半干法粉和干法粉的典型颗粒形貌^[16];经湿热处理后,两组样品的颗粒结构仍保持得较为完整,但几何形态发生改变,颗粒分散性显著降低,出现明显的聚集融合现象,且该现象随着样品湿热处理时水分含量的增加而愈发显著,可归因于水热的共同作用导致部分淀粉发生糊化,进而引发颗粒间的黏附与聚集。此外,两组样品的颗粒形貌变化也存在明显差异:湿热处理后,整米组的部分

颗粒表面出现清晰的凹陷与破损,而米粉组的颗粒形貌则仍饱满圆润;造成这一差异的原因可能有:① 淀粉颗粒在湿热处理过程中会经历吸水膨胀与冷却收缩的过程,胀缩差异会使颗粒表面产生应力集中,进而诱发凹坑与破损的形成^[17];② 整米组是在湿热处理后进行粉碎,此时机械力的作用可能导致更多的淀粉破损,进而加剧其颗粒表面结构的不完整性。

2.3 粒径分布和破损淀粉含量

由图 2 可知,仅对照样 1 呈现出较为明显的双峰分布,其余样品均为单峰,经湿热处理后,两组样品的主峰均向右偏移,且峰高呈增大的趋势。由表 2 可知,湿热处理时的水分含量显著影响样品的粒径分布参数,随着水

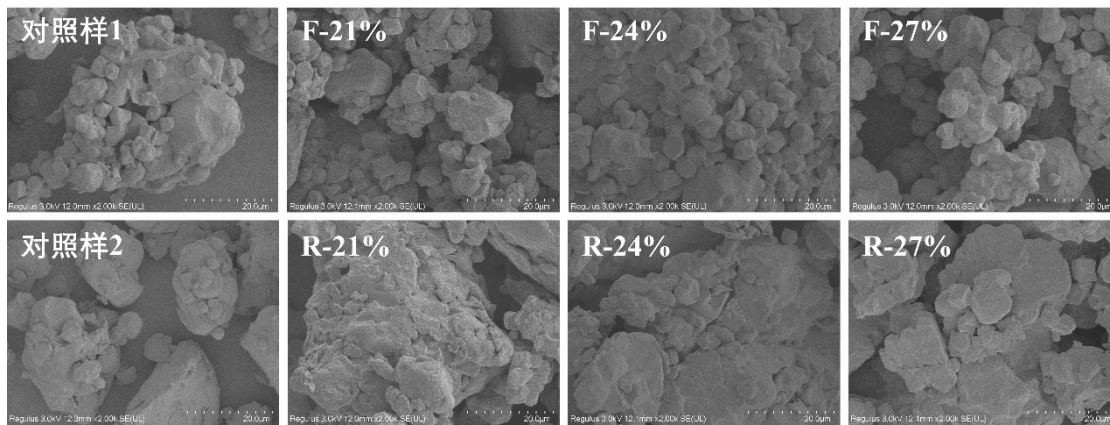


图1 米粉和整米经湿热处理后样品的SEM图

Figure 1 SEM images of rice flour and whole rice grain samples subjected to heat-moisture treatment

分含量的升高,两组样品的小颗粒和中颗粒占比均减小,大颗粒占比增大,特征粒径值(D_{10} 、 D_{50} 和 D_{90})也整体呈增大趋势,可能是湿热处理导致部分淀粉糊化,以及水分子进入颗粒内部促使其结构伸展、体积膨胀^[18]。此外,整米组的特征粒径值均显著大于米粉组,该差异是由于整米组是在湿热处理后才粉碎造成的,此时整米组样品的水分含量(21%~27%)低于米粉半干粉碎(约33%)时的,且湿热处理后部分淀粉糊化易导致颗粒间的黏附与聚集。在破损淀粉含量方面,对照样2的破损淀粉含量为9.39%,显著高于对照样1,与梁钦梅等^[19]的研究结论一致;经湿热处理后,两组样品的破损淀粉含量均随处理水分含量的升高而增大,可归因于强湿热条件对淀粉颗粒及结晶结构的破坏作用^[20];同时,整米组的破损淀粉含量均高于米粉组,其中R-27%的破损淀粉含量(9.51%)甚至已超过对照样2,这归因于整米组是先湿热处理后粉碎的工艺流程。

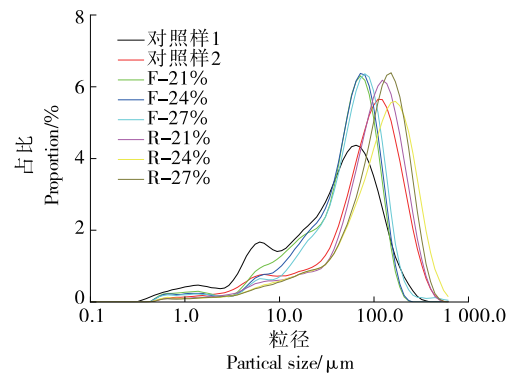


图2 米粉和整米经湿热处理后样品的粒径分布图

Figure 2 Particle size distribution curves of rice flour and whole rice grain samples subjected to heat-moisture treatment

2.4 晶体结构特征

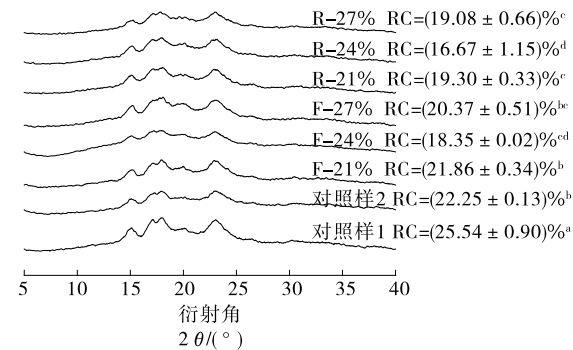
由图3可知,湿热处理后米粉和整米两组样品的X-射线衍射图谱在 15° 、 17° 、 18° 、 23° 附近均出现明显衍射

表2 米粉和整米经湿热处理后样品的粒径分布参数及破损淀粉含量[†]

Table 2 Particle size distribution parameters and damaged starch content of rice flour and whole rice grain samples subjected to heat-moisture treatment

样品	小颗粒占比 ($<2\ \mu\text{m}$)/%	中颗粒占比 ($2\sim10\ \mu\text{m}$)/%	大颗粒占比 ($>10\ \mu\text{m}$)/%	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{50}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$	破损淀粉/%
对照样1	5.35 ± 0.10^a	17.05 ± 0.91^a	77.61 ± 0.82^f	4.62 ± 0.07^g	41.73 ± 0.13^g	125.45 ± 1.15^f	4.22 ± 0.04^d
F-21%	3.34 ± 0.02^b	9.36 ± 0.42^b	87.30 ± 0.40^c	8.40 ± 0.09^f	56.43 ± 0.26^f	116.35 ± 1.75^g	4.72 ± 0.04^d
F-24%	2.84 ± 0.05^c	6.33 ± 0.69^c	90.83 ± 0.73^d	10.61 ± 0.01^e	58.40 ± 0.45^f	122.00 ± 0.50^{fg}	4.88 ± 0.04^d
F-27%	2.82 ± 0.03^d	5.95 ± 0.10^{cd}	91.43 ± 0.13^{cd}	12.61 ± 0.08^d	65.83 ± 0.16^e	137.05 ± 1.15^e	7.67 ± 0.21^c
对照样2	1.88 ± 0.02^e	7.99 ± 0.05^b	90.14 ± 0.02^d	10.71 ± 0.04^e	94.80 ± 0.76^d	217.65 ± 2.15^d	9.39 ± 0.21^a
R-21%	1.45 ± 0.04^{fg}	5.91 ± 0.12^{cd}	92.64 ± 0.08^{bc}	15.93 ± 0.34^c	105.25 ± 0.75^c	230.65 ± 1.35^c	7.42 ± 0.04^c
R-24%	1.51 ± 0.06^f	4.86 ± 0.13^{cd}	93.64 ± 0.18^{ab}	18.86 ± 0.07^b	128.65 ± 0.75^a	297.65 ± 2.05^a	8.49 ± 0.21^b
R-27%	1.29 ± 0.03^g	4.52 ± 0.02^d	94.19 ± 0.04^a	21.51 ± 1.39^a	123.15 ± 1.45^b	253.90 ± 2.00^b	9.51 ± 0.41^a

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$); D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 代表粒径分布曲线中累积分布为10%、50%、90%时颗粒的等效直径。



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图3 米粉和整米经湿热处理后样品的X-射线衍射图谱

Figure 3 X-ray diffraction patterns of rice flour and whole rice grain samples subjected to heat-moisture treatment

峰,该特征与对照样1、2基本一致,说明湿热改性后两组样品仍保留大米淀粉典型的A型结晶结构^[21]。在结晶度方面,对照样1、2的结晶度分别为25.54%、22.25%,与梁钦梅等^[19]和丁岚^[22]的报道相一致;湿热处理显著影响结晶度,随着水分含量的升高,两组样品的结晶度均呈先减小后增大,湿热处理后结晶度的减小可归因于水热作用破坏了淀粉半结晶区的有序结构或是进一步扩大了无定形区域的占比^[23],而水分含量为27%时结晶度小幅回升,可能是该水分条件更利于淀粉分子发生重排,促使部分有序结构得到有限恢复^[24]。

2.5 热力学特性

由图4和表3可知,对照样1的峰值温度(T_p)和热焓值(ΔH)分别为77.93℃和8.26 J/g,对照样2则表现出略高的 T_p (78.97℃)和较小的 ΔH (6.91 J/g),主要是二者的粉碎方式不同,因为缺乏水分的润滑作用,干法粉碎易造成更多的破损淀粉,进而导致热焓值减小^[19]。湿热处理显著影响两组样品的热力学特性,随着水分含量的增大,两组样品的起始温度(T_0)、 T_p 、终止温度(T_c)均整体呈升高趋

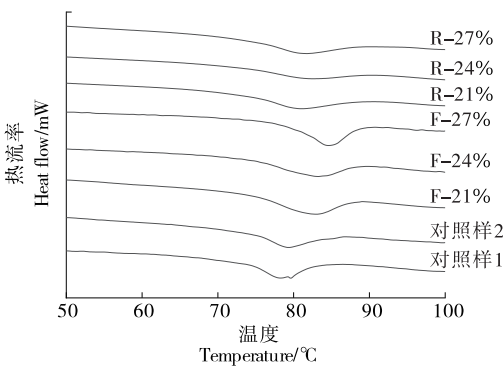


图4 米粉和整米经湿热处理后样品的热力学曲线

Figure 4 Thermodynamic curves of rice flour and whole rice grain samples subjected to heat-moisture treatment

势, ΔH 则先减小后增大;样品吸热峰的右移(图4)表明在湿热处理过程中形成了更为规整的晶体结构^[25],进而提升了淀粉结晶结构的热稳定性,且较高的水分含量更有利于这种提升,与Gunaratne等^[26]的研究结果一致; ΔH 的变化可归因于湿热条件下淀粉结晶区内部分双螺旋结构的破坏和新双螺旋的形成^[27],其变化趋势与X射线衍射分析中结晶度的变化规律相吻合。此外,湿热处理后,整米组样品相较于米粉组表现出略低的 T_0 、 T_p 和 ΔH 值,说明两种不同形态物料的湿热改性效果存在差异。

2.6 糊化特性

由图5和表4可知,对照样1、2均表现出典型的籼米粉糊化曲线特征:曲线整体起伏幅度较大,峰值黏度出现在95℃保温阶段,降温阶段迅速回生且具有较大的回生值^[28]。与对照样1相比,对照样2的峰值时间和成糊温度显著降低,可能是由于干法制粉导致对照样2的淀粉破损过多,因此糊化过程中易水合且黏度上升较快,与宋昕等^[8]的研究结果相似。湿热处理后,两组样品的糊化曲线均位于对照样下方,峰值黏度、最终黏度、崩解值及回生

表3 米粉和整米经湿热处理后样品的热力学参数[†]

Table 3 Thermodynamic parameters of rice flour and whole rice grain samples subjected to heat-moisture treatment

样品	$T_0/^\circ\text{C}$	$T_p/^\circ\text{C}$	$T_c/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$
对照样1	73.39 ± 0.09^e	77.93 ± 0.01^h	82.42 ± 0.01^e	8.26 ± 0.05^a
F-21%	75.67 ± 0.10^e	82.49 ± 0.11^c	87.20 ± 0.01^c	7.55 ± 0.31^b
F-24%	76.67 ± 0.02^b	83.11 ± 0.19^b	87.77 ± 0.02^{bc}	6.46 ± 0.21^d
F-27%	79.82 ± 0.37^a	84.39 ± 0.16^a	88.19 ± 0.30^b	7.42 ± 0.05^{bc}
对照样2	74.43 ± 0.01^d	78.97 ± 0.06^g	83.93 ± 0.51^d	6.91 ± 0.28^{cd}
R-21%	73.73 ± 0.26^e	80.51 ± 0.09^f	88.04 ± 0.05^b	6.85 ± 0.00^{cd}
R-24%	74.75 ± 0.02^d	81.54 ± 0.07^d	89.10 ± 0.17^a	5.01 ± 0.15^e
R-27%	74.46 ± 0.06^d	80.92 ± 0.03^c	88.41 ± 0.10^{ab}	6.32 ± 0.03^d

[†] 同列字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

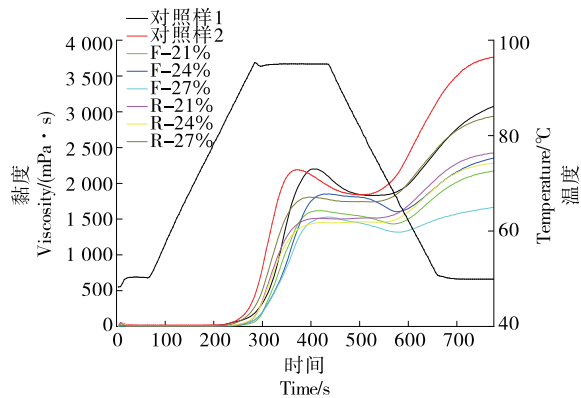


图5 米粉和整米经湿热处理后样品的RVA图谱

Figure 5 RVA profiles of rice flour and whole rice grain samples subjected to heat-moisture treatment

值减小,峰值时间滞后,成糊温度增大,但水分含量对糊化特征参数的影响无规律性,例如,在米粉组样品中,F-24%表现出较高的峰值黏度、最终黏度、崩解值和回生值,整米组中则是R-27%样品。峰值黏度代表淀粉颗粒在破裂前吸水膨胀的能力,湿热处理后样品的抗溶胀性可能源于其淀粉分子内氢键的重排,这种重排会抑制淀

粉颗粒溶胀,同时还能提升淀粉颗粒抗机械剪切的稳定性和热稳定性^[29],进而降低崩解值。Adebawale等^[30]研究发现,黏度降低是湿热处理引发淀粉分子重组造成的,分子重组会限制淀粉的水合作用,进而降低其溶胀能力。值得注意的是,整米组样品的崩解值均小于对应的米粉组样品,例如F-24%的崩解值为235.5 mPa·s,R-24%则仅为5 mPa·s,说明经湿热改性后整米组样品展现出更优异的热糊稳定性。降温阶段黏度的回升受淀粉颗粒大小、未破碎的溶胀颗粒以及直链淀粉浸出量的影响,两组样品回生值的显著减小说明湿热改性可以有效提升样品的抗回生能力,类似结论在玉米淀粉和大米淀粉的相关研究中已被报道^[14,31]。至于湿热改性后两组样品的峰值时间滞后,成糊温度增大,可归因于湿热处理促使淀粉颗粒发生结构重排,进而提升了颗粒内部的有序化程度^[32]。

2.7 质构特征

由表5可知,对照样1的硬度和咀嚼性分别为1.82, 0.82 N,对照样2的略低,在弹性和内聚性上二者无显著差异。湿热处理后,米粉和整米两组样品的凝胶质构表现出不同的变化规律,与对照样1相比,米粉组样品的硬度、咀嚼性和回复性均显著减小,弹性和内聚性则变化较

表4 米粉和整米经湿热处理后样品的糊化特性[†]

Table 4 Gelatinization properties of rice flour and whole rice grain samples subjected to heat-moisture treatment

样品	峰值黏度/(mPa·s)	崩解值/(mPa·s)	最终黏度/(mPa·s)	回生值/(mPa·s)	峰值时间/min	成糊温度/°C
对照样1	2 177.5±23.5 ^a	381.0±9.0 ^a	3 044.0±33.0 ^b	1 247.5±0.5 ^b	6.8±0.0 ^{de}	89.3±0.3 ^d
F-21%	1 621.5±3.5 ^c	203.5±17.5 ^d	2 155.0±17.0 ^{de}	737.0±3.0 ^d	6.9±0.1 ^{bcd}	93.3±0.3 ^a
F-24%	1 853.5±2.5 ^b	235.5±12.5 ^c	2 415.5±62.5 ^c	797.5±47.5 ^{cd}	7.1±0.0 ^{ab}	92.5±0.5 ^{ab}
F-27%	1 545.0±15.0 ^{cd}	196.0±1.0 ^d	1 979.5±16.5 ^e	630.5±0.5 ^e	7.1±0.1 ^a	93.3±0.4 ^a
对照样2	2 205.5±14.5 ^a	349.0±2.0 ^b	3 784.0±21.0 ^a	1 927.5±4.5 ^a	6.2±0.0 ^f	83.6±0.4 ^c
R-21%	1 522.5±10.5 ^{cd}	13.0±0.0 ^f	2 366.5±56.5 ^{cd}	857.0±67.0 ^c	6.9±0.0 ^{cde}	89.6±0.0 ^{cd}
R-24%	1 441.5±10.5 ^d	5.0±1.0 ^f	2 258.5±18.5 ^{cd}	822.0±9.0 ^{cd}	7.1±0.1 ^{abc}	91.7±0.4 ^b
R-27%	1 823.5±14.5 ^b	72.0±3.0 ^e	2 933.5±0.5 ^b	1 182.0±11.0 ^b	6.7±0.1 ^e	90.5±0.0 ^c

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表5 米粉和整米经湿热处理后样品的质构特性[†]

Table 5 Texture properties of rice flour and whole rice grain samples subjected to heat-moisture treatment

样品	硬度/N	弹性	内聚性	咀嚼性/N	回复性
对照样1	1.82±0.04 ^{ab}	0.95±0.01 ^a	0.47±0.02 ^{ab}	0.82±0.04 ^a	0.07±0.00 ^b
F-21%	0.83±0.02 ^c	0.89±0.03 ^b	0.52±0.02 ^a	0.39±0.01 ^d	0.03±0.00 ^f
F-24%	1.02±0.00 ^d	0.92±0.02 ^{ab}	0.47±0.01 ^{ab}	0.45±0.00 ^d	0.03±0.00 ^f
F-27%	0.93±0.01 ^{de}	0.95±0.00 ^a	0.48±0.03 ^{ab}	0.42±0.03 ^d	0.03±0.00 ^{ef}
对照样2	1.50±0.01 ^c	0.95±0.00 ^a	0.44±0.00 ^{bc}	0.64±0.00 ^c	0.04±0.00 ^{de}
R-21%	1.85±0.01 ^a	0.83±0.00 ^c	0.39±0.01 ^c	0.59±0.01 ^c	0.08±0.00 ^a
R-24%	1.70±0.04 ^b	0.96±0.01 ^a	0.38±0.00 ^c	0.63±0.01 ^c	0.06±0.01 ^{bc}
R-27%	1.77±0.08 ^{ab}	0.94±0.02 ^{ab}	0.43±0.03 ^{bc}	0.71±0.00 ^b	0.05±0.01 ^{cd}

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

小;与之相反的是,相比于对照样 2,整米组样品的硬度和回复性略有增大,弹性、内聚性和咀嚼性则变化较小;这导致整米组样品的硬度、咀嚼性和回复性均高于米粉组,内聚性则低于米粉组。此外,同组样品间,水分含量对其质构特性的影响较小。直链淀粉是凝胶网状结构的核心组成物质,其分子间交联程度直接影响凝胶性能,交联程度越高,凝胶的硬度、咀嚼性越大,整体强度也随之提升^[33]。湿热处理后,米粉组样品的凝胶硬度和咀嚼性显著下降,一方面可能源于直链淀粉含量的降低,另一方面,湿热处理过程中淀粉颗粒表面包裹的蛋白质发生变性以及淀粉脂质复合物的生成,也会共同抑制淀粉颗粒的溶胀作用,进而削弱凝胶强度^[34]。

3 结论

系统比较了湿热改性后米粉和整米两组样品在化学组成、颗粒形貌、晶体结构和粉质特性上的差异。结果表明,湿热处理会造成淀粉颗粒聚集、粒径增大、破损淀粉含量上升,同时改变结晶度及热力学、糊化特性,提升样品的抗回生能力与热糊稳定性。相同处理条件下,整米组表现为粒径更大、破损淀粉含量更高,颗粒易出现凹陷破损,且热糊稳定性更优;米粉组则保持颗粒饱满,凝胶强度下降、崩解值更大。同组样品中,随着处理水分含量的升高,粒径随之增大,破损淀粉含量增加,结晶度呈先降后升趋势,热特性表现为特征温度整体升高、热焓值先减小后增大,而处理水分含量对质构特性影响较小,对糊化特性的影响无明显规律。后续将探索两种湿热改性米粉在米线、米发糕等传统米制品加工中的应用。

参考文献

- [1] Thuengtung S, Ketnawa S, Ding Y C, et al. Effect of heat-moisture treatment to raw paddy rice (*Oryza sativa* L.) on cooked rice properties[J]. Journal of Future Foods, 2021, 1(2): 179-186.
- [2] Chi C D, Ren W W, Yang Y, et al. Starch ordered structures control starch reassembly behaviors during heat-moisture treatment for modulating its digestibility[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 136966.
- [3] 王晓培, 陈正行, 李娟, 等. 湿热处理对大米淀粉理化性质及其米线品质的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(5): 182-187, 210. Wang X P, Chen Z X, Li J, et al. Effect of heat-moisture treatment on various physicochemical properties of rice starch and quality of rice starch noodles[J]. Food & Machinery, 2017, 33(5): 182-187, 210.
- [4] 王艳, 王宏伟, 王凯旭, 等. 湿热处理对大米淀粉流变特性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 48-52. Wang Y, Wang H W, Wang K X, et al. Effect of heat-moisture treatment on rheological properties of rice starch[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 48-52.
- [5] Majzoobi M, Pesaran Y, Mesbahi G, et al. Evaluation of the effects of hydrothermal treatment on rice flour and its related starch[J]. International Journal of Food Properties, 2016, 19(9): 2 135-2 145.
- [6] 唐玮泽. 多次湿热处理对大米淀粉和米粉消化性的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021: 24-43. Tang W Z. The effect of multiple heat-moisture treatment on digestibility of rice starch and rice noodle[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021: 24-43.
- [7] Arns B, Paraginski R T, Bartz J, et al. The effects of heat-moisture treatment of rice grains before parboiling on viscosity profile and physicochemical properties[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49(8): 1 939-1 945.
- [8] 宋昕, 冯伟, 王涛, 等. 不同制粉方式对米粉粉质和鲜湿米线品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(5): 42-50. Song X, Feng W, Wang T, et al. Effect of different milling methods on the physicochemical properties of rice flour and the qualities of fresh rice noodles[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(5): 42-50.
- [9] 李梦锦, 张昊, 冯伟, 等. 大米淀粉结构与功能性质相关性分析及其在珍珠粉圆中应用初探[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(23): 304-311. Li M J, Zhang H, Feng W, et al. Correlation analysis of structural and functional properties of rice starch and its application in starch pearl: a preliminary study[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(23): 304-311.
- [10] 汤佳媛, 李建功, 李广华, 等. 甘薯淀粉热力学性质的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2026, 41(7): 179-188. Tang J Y, Li J G, Li G H, et al. Research progress on thermodynamic properties of sweetpotato starch[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2026, 41(7): 179-188.
- [11] 曹怡君, 冯伟, 王韧, 等. 差异化蛋白脱除对早籼米粉性质的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(8): 16-22, 39. Cao Y J, Feng W, Wang R, et al. Effects of differential protein removal on the properties of early indica rice flour[J]. Food & Machinery, 2024, 40(8): 16-22, 39.
- [12] 曹松, 周洲, 董明, 等. 不同实验室干法制备工艺对糯米粉品质特性的影响[J]. 现代食品, 2021, 29(17): 60-63, 69. Cao S, Zhou Z, Dong M, et al. Effects of dry preparation processes in different laboratories on the quality characteristics of glutinous rice flour[J]. Modern Food, 2021, 29(17): 60-63, 69.
- [13] Bian L L, Chung H J. Molecular structure and physicochemical properties of starch isolated from hydrothermally treated brown rice flour[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 60: 345-352.
- [14] Chung H J, Hoover R, Liu Q. The impact of single and dual hydrothermal modifications on the molecular structure and physicochemical properties of normal corn starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2009, 44

- (2): 203-210.
- [15] Lan H, Hoover R, Jayakody L, et al. Impact of annealing on the molecular structure and physicochemical properties of normal, waxy and high amylose bread wheat starches[J]. Food Chemistry, 2008, 111(3): 663-675.
- [16] 高晓旭, 佟立涛, 钟葵, 等. 不同磨粉工艺对大米粉粉质特性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(1): 194-199.
- Gao X X, Tong L T, Zhong K, et al. Effect of milling processes on quality of rice flour[J]. Modern Food Science & Technology, 2015, 31(1): 194-199.
- [17] 赵佳. 水-热处理对淀粉理化特性的影响[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2012: 22.
- Zhao J. Effects of hydrothermal on the physicochemical properties of starches[D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2012: 22.
- [18] Wang Y M, Li M, Shen C Y. Effect of constrained annealing on the microstructures of extrusion cast polylactic acid films[J]. Materials Letters, 2011, 65(23/24): 3 525-3 528.
- [19] 梁钦梅, 程子良, 王福, 等. 不同磨粉工艺对大米粉及鲜湿米粉品质的影响[J]. 食品工业, 2024, 45(3): 30-34.
- Liang Q M, Cheng Z L, Wang F, et al. The influence of different milling techniques on the quality of large rice noodles and fresh and wet rice noodles[J]. The Food Industry, 2024, 45 (3): 30-34.
- [20] 李明菲. 不同热处理方式对小麦粉特性影响研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016: 21.
- Li M F. Study on the effects of different heat treatment on wheat flour characteristics[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016: 21.
- [21] 王宏伟. 湿热处理和脂肪酸复合作用调控大米淀粉消化性能及营养功能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017: 91.
- Wang H W. Understanding the digestion and nutritional function of rice starch subjected to heat-moisture treatment and fatty acid complex[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017: 91.
- [22] 丁岚. 不同加工工艺对米线品质及消化性的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020: 28.
- Ding L. Effects of different processing techniques on the quality and digestibility of rice noodles[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020: 28.
- [23] Jin X Y, Cheng L, Hong Y, et al. Effect of heat-moisture treatment (HMT) on thermal stability of starch gel and the surface adhesiveness of vermicelli[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 226: 927-934.
- [24] 郝赫男. 不同热处理对大米及糯米淀粉理化性质和体外消化性的影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2019: 20.
- Hao H N. Effect of different heat treatment on the physicochemical properties and *in vitro* digestibility of starches from normal rice and waxy rice[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019: 20.
- [25] Sui Z Q, Yao T M, Zhao Y, et al. Effects of heat-moisture treatment reaction conditions on the physicochemical and structural properties of maize starch: moisture and length of heating[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 1 125-1 132.
- [26] 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.
- [27] 汝远. 热处理对玉米淀粉结构和性质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015: 18.
- Ru Y. Effect of heat treatment on structure and properties of corn starch[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2015: 18.
- [28] 李江涛, 周巧, 林亲录, 等. 不同糊化度籼米淀粉的结构及理化性质研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(4): 76-82.
- Li J T, Zhou Q, Lin Q L, et al. Structure and physicochemical properties of indica rice starch with different degrees of gelatinization[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(4): 76-82.
- [29] Arns B, Bartz J, Radunz M, et al. Impact of heat-moisture treatment on rice starch, applied directly in grain paddy rice or in isolated starch[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(2): 708-713.
- [30] Adebawale K O, Afolabi T A, Olu-Owolabi B I. Hydrothermal treatments of Finger millet (*Eleusine coracana*) starch[J]. Food Hydrocolloids, 2005, 19(6): 974-983.
- [31] Hoover R, Manuel H. The effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of normal maize, waxy maize, dull waxy maize and amylo maize V starches[J]. Journal of Cereal Science, 1996, 23(2): 153-162.
- [32] Le Thi Huyen Trang, 李向红, 苗金旭, 等. 湿热处理改性小麦粉的热流变特性及其在杂粮饼干中的应用[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 135-142.
- Le Thi Huyen Trang, Li X H, Miao J X, et al. Thermal rheological properties of heat-moisture modified and its application in multigrain cookies[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 135-142.
- [33] 宋昕. 不同制粉方式对米粉粉质和米线品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2024: 22.
- Song X. Effect of different milling methods on the physicochemical properties of rice flour and the qualities of rice noodles[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024: 22.
- [34] Pancha-Arnon S, Uttapap D. Rice starch vs. rice flour: differences in their properties when modified by heat-moisture treatment[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 91(1): 85-91.