

高压射流磨处理对燕麦浆稳定性的影响

Effect of the high pressure jet mill treatment on the stability of oat pulp

黄素君¹ 王月茹¹ 邓莉萍² 罗舜菁¹ 刘成梅¹

HUANG Su-jun¹ WANG Yue-ru¹ DENG Li-ping² LUO Shun-jing¹ LIU Cheng-mei¹

(1. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 江西 南昌 330047;

2. 江西大北农科技有限责任公司, 江西 南昌 331700)

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330047, China; 2. Jiangxi Dabeinong Technology Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 331700, China)

摘要:目的:研究高压射流磨对燕麦浆稳定性的影响及机制,为全谷物饮料加工提供依据。方法:采用不同压力高压射流磨对燕麦浆进行处理,比较贮藏期(30 d)的形态、不稳定指数、粒径、流变特性变化,并对微观形貌(光学显微镜、激光共聚焦扫描显微镜、扫描电子显微镜)、可溶性成分含量(可溶性固形物、可溶性蛋白、可溶性膳食纤维)进行分析。结果:高压射流磨处理使燕麦浆的粒径、不稳定指数、表观黏度逐渐减小,并能减缓淀粉的老化和颗粒的聚集。高压射流磨能均化蛋白和油脂,破坏细胞壁组织纤维,使更多可溶性物质溶出,并在颗粒内部产生孔隙,增加水合能力,提高体系总体稳定性。结论:高压射流磨技术可提高全谷物产品贮藏稳定性,延长货架期。

关键词:微射流;燕麦;高压射流磨;稳定性;老化;可溶性成分;理化性质

Abstract: Objective: To study the effect and mechanism of the high-pressure jet mill on the stability of oat pulp, and to provide a theoretical reference for the processing of whole grain beverages.

Methods: The oat pulp was processed with different pressures and high-pressure jet mills, and the morphology, instability index, particle size, and rheological properties of the storage period (30 d) were compared. Moreover the microscopic morphology (optical microscope, laser confocal scanning microscope), scanning electron microscope), soluble component content (soluble solids, soluble protein, soluble dietary fiber) were analyzed. **Results:** The high-pressure jet mill treatment gradually reduced the particle size, instability index, and apparent viscosity

of oat pulp, and slowed down starch aging and particle aggregation. The high-pressure jet mill could homogenize protein and grease, destroy cell wall tissue fibers, dissolve more soluble substances, and create cavities in the particles, resulting in hydration capacity increase, and the improvement the system stability. **Conclusion:** The high-pressure jet mill technology can improve the storage stability of whole-grain products and prolong the shelf life.

Keywords: microjet; oat; high-pressure jet mill; stability; aging; soluble substance; physical and chemical properties

全谷物的麸皮对降低 2 型糖尿病、心血管疾病、结直肠癌、消化系统疾病的发病风险有益,并有利于控制体重^[1]。然而,由于全谷物口感不佳,不易被消费者接受,通过精加工去除全谷物麸皮是提高其食用品质的常用方法,但会导致大多数膳食纤维、维生素、矿物质和活性成分流失^[2]。随着健康理念深入人心,全谷物食品正成为一种新兴趋势^[3]。

目前,全谷物被制成全麦面包、糙米面条等,开发全谷物饮料是最受欢迎的研究方向之一。全谷物饮料是由大尺寸分散淀粉、蛋白质、膳食纤维、脂肪小球等组成的悬浮液^[4],是一种不稳定体系,易于分层。已有大量研究表明通过发酵^[5]、发芽^[6]或酶水解可以延长全谷物饮料的保质期并改善风味^[7],但过滤等工艺过程均会造成大量营养物质的流失。

课题组^[8]设计了一个工业规模的微射流系统,该系统由预湿磨和工业级微射流组成^[8],即高压射流磨系统。高压射流磨处理能力高达 5 000 L/h,远远高于传统微射流^[9],达到工业生产水平。其腔口直径为 300~500 μm ,可避免大颗粒材料的堵塞,适用范围广泛。基于此系统,无需添加任何稳定剂或过滤豆渣,即可生产出稳定性极好的全豆豆浆^[7]。因此,高压射流磨具有免过滤生产全

基金项目:“十三五”国家重点研发计划子课题(编号:2017YFD0401103-6)

作者简介:黄素君,女,南昌大学在读硕士研究生。

通信作者:邓莉萍(1970—),女,江西大北农科技有限责任公司高级工程师,硕士。E-mail: 943165474@qq.com

收稿日期:2021-04-16

谷物饮料的潜力。

燕麦是全球消费的全谷物之一,与其他全谷物相比,其 β -葡聚糖含量更高^[10]。 β -葡聚糖是一种黏性多糖,具有增稠特性^[11]。同时,燕麦具有更丰富的膳食纤维,具有更大的黏弹性和抗应力性^[12],粉碎难度大。研究拟选取燕麦作为全谷物代表,模拟全谷物饮料生产工艺,探究高压射流磨处理压力对燕麦浆稳定性的影响,并研究其稳定性机制,旨在为全谷物饮料加工提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

燕麦:赣州康瑞农产品有限公司;

考马斯亮蓝法试剂盒(P0017A):碧云天生物试剂公司;

总淀粉测定试剂盒(K-TST A-100A)、总膳食纤维测定试剂盒(K-TDFR-200A):爱尔兰 Megazyme 公司;

丙酮、石油醚、氢氧化钠等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

湿法粉碎机:XCFC-2018 型,北京协同创新食品科技有限公司;

高压射流磨:SPJ-500 型,北京协同创新食品科技有限公司;

流变仪:MCR302 型,奥地利 Anton-Paar 公司;

稳定分析仪:LUMiFuge 型,德国 Lum GmbH 公司;

激光衍射粒度分析仪:Mastersizer3000 型,英国马尔文仪器有限公司;

光学显微镜:Axio Imager 2 型,北京普瑞赛司仪器有限公司;

发射扫描电子显微镜:JSM-6701F 型,日本 JEOL 公司;

激光共聚焦扫描显微镜:LSM710 型,德国卡尔蔡司公司;

手持数显折光仪:PAL-1 型,日本 Atago 公司。

1.2 方法

1.2.1 燕麦浆的制备 燕麦于 170 °C 烘烤 20 min 灭酶,与水按 $m_{\text{燕麦}} : m_{\text{水}}$ 为 6 : 94 预湿磨,制成 6% 燕麦浆。设定高压射流磨处理压力分别为 30, 60, 90, 120 MPa, 对燕麦浆进行处理,同时将预湿磨但未经高压射流磨处理的样品标记为 0 MPa。样品于 95~100 °C 熟化 30 min,以模拟谷物饮料生产过程,并加入质量分数为 0.05% 的叠氮化钠水溶液抑制微生物的生长。

1.2.2 贮藏稳定性 所有样品于常温贮藏,并观察贮藏第 0, 3, 7, 14, 21, 30 天的外观。

1.2.3 不稳定性指标分析 采用稳定分析仪评估贮藏期

各样品的稳定性。以 4 000 r/min 离心 1 h,近红外波长(865 nm)发射的光束对 2 mm×8 mm 的矩形单元中的样品进行分析,25 °C 下每 10 s 扫描一次。

1.2.4 粒径分析 采用激光衍射粒度分析仪测量贮藏期各样品的粒径分布。设定折射率为 1.590,平均粒径大小以 $D_{[4.3]}$ 表示。

1.2.5 流变特性分析 采用流变仪测量贮藏期各样品的流变特性。将 16 mL 摇匀样品转移至同心圆柱中,25 °C 下以 0.1~300.0 s^{-1} 的剪切速率测量表观黏度,应变值设定为 0.1。

1.2.6 形态分析

(1) 光学显微镜:将原样品和稀释一倍样品置于载玻片上,使用光学显微镜于 25 °C 下观察样品结构。

(2) 激光共聚焦扫描显微镜(CLSM):分别使用 FITC(1 mg/mL,溶于 DMSO)和尼罗红(1 mg/mL,溶于乙醇)对蛋白质和油滴进行染色,激发波长分别为 568, 488 nm,40 倍油镜下观察样品。

(3) 扫描电子显微镜(SEM):将冻干样品固定于导电双面胶上,利用离子溅射镀膜仪镀金,采用 SEM 以低真空模式于 20 kV 的加速电压下放大 3 000 倍,观察样品微观形貌结构。

1.2.7 可溶性成分含量测定

(1) 可溶性固形物含量:使用手持数显折光仪进行测定^[13]。

(2) 可溶性蛋白含量:参照 Peng 等^[14]的方法。

(3) 可溶性膳食纤维含量:参照 Li 等^[17]的方法。

1.3 数据分析

使用 SPSS 17 软件进行单向方差分析(ANOVA),通过 Duncan 检验在 5% 的显著性水平($P < 0.05$)下确定均值的比较。所有试验重复 3 次,数据以平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 高压射流磨处理压力对燕麦浆贮藏稳定性的影响

试验发现,贮藏第 7 天,不添加任何稳定剂的所有样品均保持了良好的贮藏稳定性;贮藏第 14 天,0, 30 MPa 样品上层出现轻微析水;贮藏第 21 天,0 MPa 样品析水分层明显,30 MPa 样品也逐渐析水分层;贮藏第 30 天,90, 120 MPa 样品仍保持稳定状态。此外,贮藏 30 d 后,各样品上层出现油脂层,处理压力越高的样品油脂层越薄,可能是由于高压处理使更多可溶性蛋白溶出,增强了体系乳化稳定性^[15]。综上,高压射流磨处理能有效提高燕麦浆的贮藏稳定性,处理压力越大,其稳定性越好。

2.2 高压射流磨处理压力对燕麦浆不稳定指数的影响

由表 1 可知,随着高压射流磨处理压力的增大,燕麦浆不稳定指数减小,稳定性增大。随着贮藏时间的延长,

表 1 高压射流磨处理压力对燕麦浆不稳定指数的影响[†]

Table 1 Effect of high pressure jet grinding pressure on instability index of oat pulp

处理压力/MPa	贮藏时间/d					
	0	3	7	14	21	30
0	0.190±0.003 ^{aA}	0.215±0.002 ^{aB}	0.233±0.006 ^{aC}	0.294±0.012 ^{aD}	0.325±0.005 ^{aE}	0.357±0.006 ^{aF}
30	0.169±0.000 ^{bA}	0.205±0.002 ^{bB}	0.211±0.001 ^{bBC}	0.219±0.002 ^{bC}	0.251±0.002 ^{bD}	0.276±0.010 ^{bE}
60	0.156±0.004 ^{cA}	0.175±0.001 ^{cB}	0.205±0.006 ^{bC}	0.216±0.001 ^{bD}	0.239±0.002 ^{cE}	0.250±0.003 ^{cF}
90	0.151±0.004 ^{cA}	0.152±0.003 ^{dA}	0.175±0.004 ^{dB}	0.197±0.000 ^{cC}	0.221±0.003 ^{dD}	0.236±0.003 ^{dE}
120	0.155±0.002 ^{cA}	0.152±0.005 ^{dA}	0.184±0.005 ^{cB}	0.199±0.003 ^{cC}	0.224±0.005 ^{dD}	0.242±0.003 ^{dE}

[†] 同行大写字母不同表示贮藏期间差异显著 ($P < 0.05$), 同列小写字母不同表示各处理组间差异显著 ($P < 0.05$)。

各处理压力下的燕麦浆样品的不稳定指数均逐渐增大, 表明燕麦浆的稳定性在贮藏期间逐渐降低。此外, 贮藏第 30 天, 0, 90, 120 MPa 样品的不稳定指数分别从 0.190, 0.151, 0.155 升高至 0.357, 0.236, 0.242, 分别增长了 88%, 56%, 56%, 表明高压射流磨处理压力越高, 不稳定指数的增长速率越慢, 样品稳定性降低越慢, 说明高压射流磨的处理使得体系能长时间维持相对稳定。

2.3 高压射流磨处理压力对燕麦浆粒径的影响

由图 1 可知, 粒径分布图中均有 3 个峰, 最小峰代表油体, 中间峰代表蛋白体, 最大峰代表膳食纤维或淀粉大颗粒^[7]。随着处理压力的增大, 粒径分布逐渐向左偏移, 表明高压射流磨对油体、蛋白、膳食纤维和淀粉均有良好

的破碎效果。

由表 2 可知, 随着处理压力的增大, 粒径逐渐减小, 当处理压力为 90 MPa 时最低, 相比 0 MPa 降低了 40%, 当处理压力为 120 MPa 时又有所升高, 表明燕麦浆颗粒在空化和碰撞产生的高度密集能量作用下逐渐破碎, 压力越大, 破碎效果越好, 粒径越小。同时, 燕麦浆在 120 MPa 处理压力下粒径有小幅度回升, 可能是粒径过小而表面积增大时, 颗粒分子间碰撞概率增大, 颗粒表面的范德华力和静电引力使其重新聚合, 粒径增大, 与图 2 的结论一致。此外, 随着贮藏时间的增长, 样品粒径均增大, 可能是淀粉的老化和颗粒的重聚集导致。同时, 处理压力越大, 粒径的增长速率越小, 说明一定的处理压力可以减缓贮藏过程中粒径的增长, 使样品体系长时间保持稳定。

2.4 高压射流磨处理压力对燕麦浆流变性质的影响

由图 2 可知, 燕麦浆呈非牛顿流体的剪切稀化现象。随着处理压力的增大, 燕麦浆在 0.1 s^{-1} 剪切频率下的起始黏度逐渐减小。虽然高压处理可能会使可溶性物含量增加, 提高体系黏度, 但完全糊化后的淀粉颗粒会形成具有高黏度的糊状物, 而高压处理的高剪切力使样品不再具有高黏性, 黏度大幅下降, 导致整体黏度下降。处理压力越大, 破坏程度越大, 表观黏度越小。

由表 3 可知, 贮藏时间越长, 所有样品的起始黏度均逐渐变小, 可能是由于糊化淀粉发生老化, 失去原有的高黏性^[16]。处理压力越大, 体系黏度变化越小, 表明糊化淀

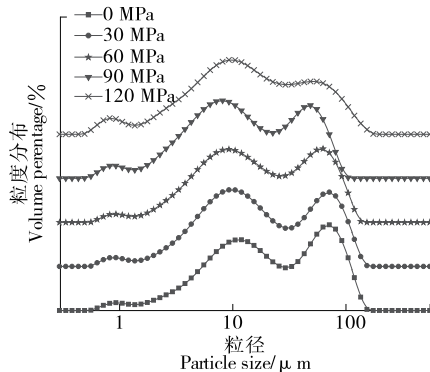


图 1 贮藏 0 d 时各样品粒径分布图

Figure 1 The particle size distribution of each sample when stored for 0 day

表 2 高压射流磨处理压力对燕麦浆粒径的影响[†]

Table 2 Effect of high pressure jet grinding pressure on particle size of oat pulp

处理压力/MPa	贮藏时间/d						μm
	0	3	7	14	21	30	
0	34.60±0.86 ^{aA}	35.70±0.85 ^{aAB}	36.50±0.82 ^{aAB}	37.90±0.57 ^{aB}	43.90±0.92 ^{aC}	45.70±3.04 ^{aC}	
30	30.70±1.78 ^{bA}	30.60±0.28 ^{bA}	31.80±0.88 ^{bA}	34.30±0.98 ^{bA}	38.10±1.22 ^{bA}	39.40±1.05 ^{bA}	
60	28.10±0.57 ^{cA}	28.50±0.28 ^{cA}	27.50±0.76 ^{cdA}	24.80±0.78 ^{dB}	24.00±0.95 ^{cB}	29.30±1.72 ^{bA}	
90	21.30±0.21 ^{eA}	24.50±0.28 ^{dB}	25.40±2.30 ^{dB}	27.10±0.46 ^{cD}	27.40±1.94 ^{bcCD}	30.40±1.44 ^{bD}	
120	22.50±0.22 ^{dA}	25.20±1.20 ^{cA}	26.40±2.04 ^{cAB}	28.80±2.31 ^{bB}	30.70±4.86 ^{aC}	32.50±3.55 ^{aC}	

[†] 同行大写字母不同表示贮藏期间差异显著 ($P < 0.05$), 同列小写字母不同表示各处理组间差异显著 ($P < 0.05$)。

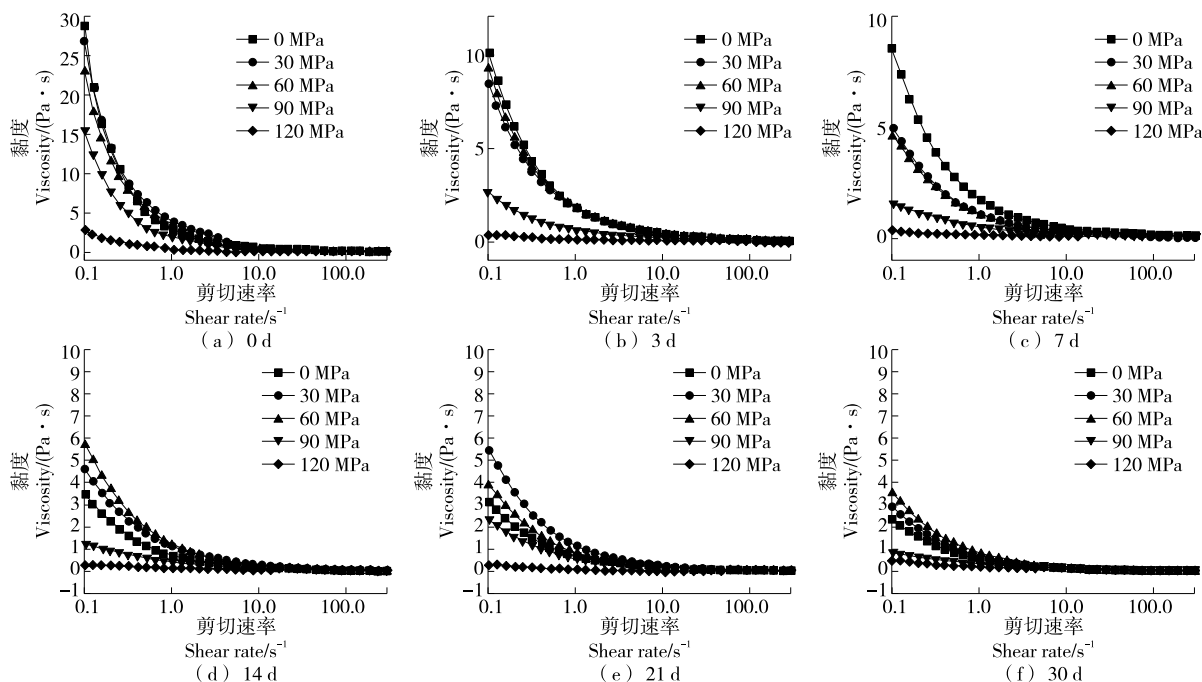


图 2 高压射流磨处理压力对燕麦浆流变性质的影响

Figure 2 Effect of high pressure jet grinding pressure on rheological properties of oat pulp

表 3 不同处理压力下样品的起始黏度随时间的变化[†]

Table 3 The change of initial viscosity with time in different pressure samples Pa · s

处理压力/MPa	贮藏时间/d					
	0	3	7	14	21	30
0	28.80	10.10	8.50	3.54	3.17	2.33
30	26.90	8.57	4.99	4.67	5.60	2.95
60	23.10	9.40	4.67	5.85	4.00	3.60
90	15.60	2.70	1.55	1.24	2.38	0.85
120	2.73	0.41	0.33	0.24	0.42	0.55

[†] 起始黏度是指燕麦浆样品在 0.1 s⁻¹ 剪切频率下的黏度。

粉在高压下被剪切成更小的分子, 粒径变小, 回生难度增大。有研究证实高压处理还能抑制大米淀粉^[17]、玉米淀粉^[18]老化。同时, 高压处理后析出更多可溶性蛋白质与淀粉发生相互作用, 也会抑制淀粉老化^[19]。当处理压力为 120 MPa 时, 样品的表观黏度几乎不会随贮藏时间的延长发生变化, 具有高稳定性。从食品工业角度而言, 老化淀粉口感差, 而高压处理的糊化淀粉不易回生、口感顺滑, 更容易被消费者接受, 高压射流磨的高压处理为淀粉类谷物饮品的开发提供了一种新思路。

2.5 高压射流磨处理压力对燕麦浆形态及微观形貌的影响

2.5.1 光学显微镜 由图 3 可知, 0 MPa 处理下的原样品中有完整清晰的蜂巢状细胞壁结构, 细胞壁被认为可能由纤维与果胶物质组成^[20], 内含大颗粒淀粉, 会导致样

品的不稳定性 and 沉淀; 30 MPa 处理下的原样品中也有细胞壁组织结构, 但已呈碎片化, 可能是高压处理对细胞壁结构造成了破坏, 同时使细胞内物质析出; 60 MPa 处理下的原样品中有零散的纤维状结构物质, 但已被压缩成较短长度; 而 90, 120 MPa 处理下的原样品中此类物质逐渐消失, 表明高压处理可以有效破碎膳食纤维和大颗粒淀粉细胞, 使体系稳定化。随着处理压力的增大, 原样品颗粒粒径逐渐减小, 整体呈均一化、平整化, 而稀释 1 倍的样品能更加清晰地观察到此类变化。

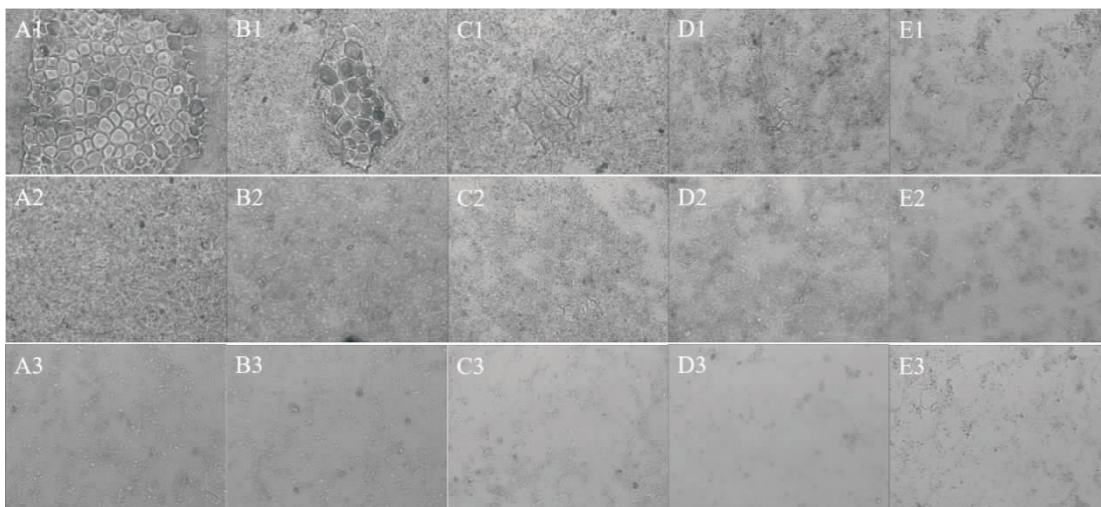
2.5.2 激光共聚焦扫描显微镜 由图 4 可知, 0, 30 MPa 处理下的样品中蛋白质呈不规则颗粒状, 此时蛋白质结构保持着高度有序的状态^[21]。随着处理压力的不断提高, 原先完整的蛋白颗粒被裂解, 游离的蛋白逐渐渗入燕麦浆体系中。Lin 等^[22]研究发现高压射流磨的高剪切力破坏了蛋白的球状结构, 变成粒径较小的可溶性蛋白单体或低聚体, 不溶性蛋白向可溶性蛋白转化, 提高了体系中的可溶性蛋白含量。燕麦浆中油体含量较低, 油体颗粒变化同蛋白质类似, 随着处理压力的提高, 油体颗粒逐渐消失并均匀分散于燕麦浆体系中。当处理压力为 90 MPa 时, 完整的游离颗粒全部消失, 这可能是由于高压均化导致油体尺寸减小, 或与蛋白体相结合阻止了油体的重聚集^[23], 从而提高了体系的稳定性。

2.5.3 扫描电子显微镜 由图 5 可知, 高压射流磨处理使得样品表面出现孔洞, 随着处理压力的增大, 孔洞逐渐变大变密。Wang 等^[24]指出微射流处理使得颗粒内部产

生孔或腔,可能会暴露出更大的表面积和更多的水结合位点。因此,微射流可能会增强颗粒的水合性能,一定程度上提高体系的贮藏稳定性。Chen 等^[25]研究发现微射流处理会在膳食纤维表面产生孔洞。孔洞增大了表面积,同时增强了膳食纤维的水合能力和对油滴、蛋白质及其他物质的吸附能力,有利于复杂体系的稳定化。

2.6 高压射流磨处理压力对燕麦浆可溶性物质的影响

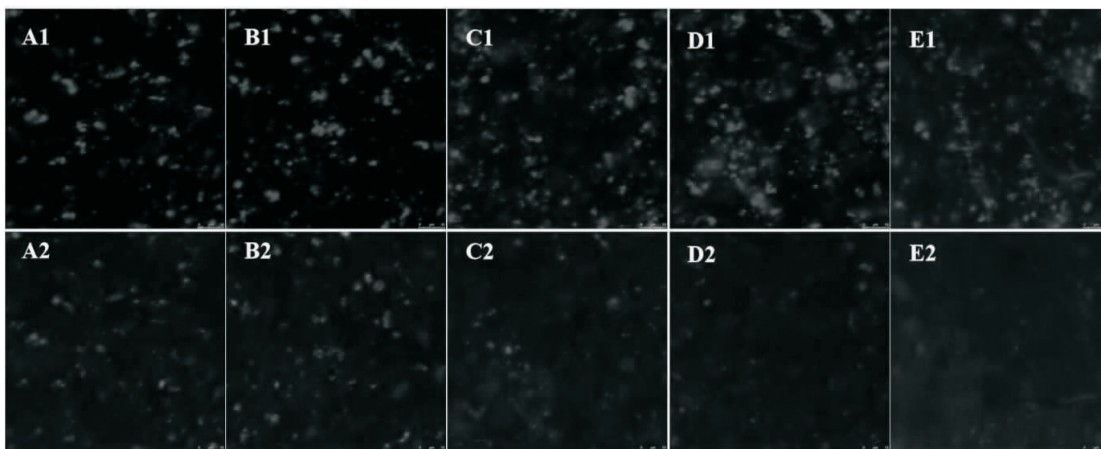
由表 4 可知,随着处理压力的增大,可溶性固形物含量升高,当处理压力为 120 MPa 时可溶性固形物含量最大,相比于 0 MPa 处理下的样品提高了 34%。随着处理压力的增大,可溶性蛋白含量总体提高,当处理压力为 90 MPa 时达到最大,当处理压力为 120 MPa 时呈轻微下



从左至右依次为 0,30,60,90,120 MPa 处理样品;从上至下依次为原样品、原样品、稀释 1 倍样品

图 3 不同处理压力下样品的光学显微镜图

Figure 3 Optical microscope images of samples with different treatment pressures



从左至右依次为 0,30,60,90,120 MPa 处理样品;上行为蛋白质,下行为油滴

图 4 不同处理压力下样品的激光共聚焦扫描显微镜图

Figure 4 Confocal laser scanning microscopy of different pressure samples

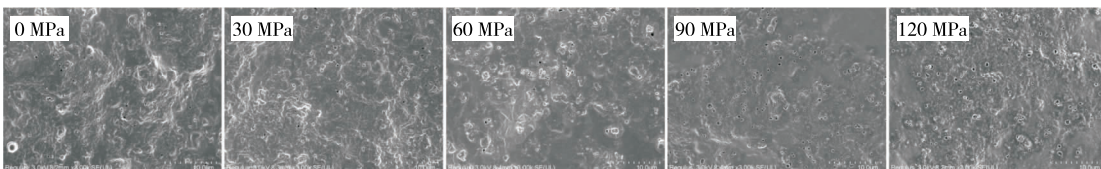


图 5 不同处理压力下样品的扫描电子显微镜图

Figure 5 Scanning electron microscopy of different pressure samples

表 4 高压射流磨处理压力对燕麦浆可溶性物质含量的影响[†]

Table4 Effect of high-pressure jet grinding pressure on soluble substance content of oat pulp

处理压力/MPa	可溶性固形物含量/%	可溶性蛋白含量/(mg·mL ⁻¹)	可溶性膳食纤维含量/%
0	2.73±0.115 ^a	0.111±0.011 ^a	2.34±0.033 ^a
30	3.03±0.153 ^b	0.156±0.021 ^b	2.65±0.032 ^b
60	3.27±0.115 ^{bc}	0.207±0.001 ^c	2.72±0.045 ^b
90	3.47±0.153 ^{cd}	0.211±0.002 ^c	2.90±0.004 ^c
120	3.66±0.100 ^d	0.172±0.013 ^b	2.92±0.010 ^c

[†] 字母不同表示差异显著(P<0.05)。

降趋势,可能是由于处理压力过高导致了高温作用,使得蛋白氧化、变性或解体,结构遭到破坏^[26]。随着处理压力的增大,可溶性膳食纤维含量逐渐增大,120 MPa 处理下的样品相比于 0 MPa 处理下的样品提高了 25%,可能是强烈的撞击剪切作用使得组织纤维变成可溶性纤维。有研究^[10]表明,可溶性膳食纤维中,燕麦β-葡聚糖可以提高谷物饮料的稳定性。综上,高压射流磨处理可以有效将不溶物质转变成可溶性物质,提升了体系的稳定性。

3 结论

以燕麦为谷物代表,高压射流磨是一种可有效提高谷物饮品稳定性的处理方法。试验表明,随着高压射流磨处理压力的增大,燕麦浆的粒径与表观黏度总体减小,总可溶性固形物含量、可溶性蛋白含量和可溶性膳食纤维含量总体增加。高压射流磨可以均化蛋白质和油脂,有效破坏细胞壁组织纤维,并在颗粒内部产生孔和腔,颗粒的水合能力增大,不易重聚集,提高了燕麦浆的贮藏稳定性,延长货架期。此外,高压射流磨对均化蛋白、抑制淀粉老化的效果与机制有待进一步研究。

参考文献

[1] GONG Er-sheng, LUO Shun-jing, LI Tong, et al. Phytochemical profiles and antioxidant activity of brown rice varieties[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 432-443.

[2] WU Wei-jing, QIU Ju, WANG Ai-li, et al. Impact of whole cereals and processing on type 2 diabetes mellitus: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(9): 1 447-1 474.

[3] 刘婷玉, 周素梅, 刘丽娅, 等. 植物基谷物饮料研究及产业开发进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 18-22, 27.
LIU Ting-yu, ZHOU Su-mei, LIU Li-ya, et al. Advances in research and industrial development of plant-based cereal beverage[J]. Food & Machinery, 2020, 36(10): 18-22.

[4] SILVA A R A, SILVA M M N, RIBEIRO B D. Health issues and technological aspects of plant-based alternative milk[J]. Food Research International(Ottawa, Ont.), 2020, 131: 108972.

[5] PEYER L C, ZANNINI E, ARENDT E K. Lactic acid bacteria as sensory biomodulators for fermented cereal-based beverages [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 54: 17-25.

[6] CÁCERES P J, PEAS E, CRISTINA M V, et al. Development of a multifunctional yogurt-like product from germinated brown rice[J]. LWT, 2019, 99: 306-312.

[7] PINELI L L O, BOTELHO R B A, SOLORZANO R P Z, et al. Low glycemic index and increased protein content in a novel quinoa milk[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1 261-1 267.

[8] LI Yu-ting, CHEN Ming-shun, DENG Li-zhen, et al. Whole soybean milk produced by a novel industry-scale microfluidizer system without soaking and filtering [J]. Journal of Food Engineering, 2021, 291: 110228.

[9] 龚二生, 熊玉峰, 罗舜菁, 等. DHPM 改性纤维对大米淀粉理化性质的影响[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 22-25.
GONG Er-sheng, XIONG Yu-feng, LUO Shun-jing, et al. Effect of the addition of insoluble dietary fibre modified by dynamic high-pressure microfluidization on physicochemical properties of rice starch[J]. Food & Machinery, 2013, 29(5): 22-25.

[10] 陈磊. 燕麦的营养功能及综合加工利用[J]. 食品与机械, 2012, 28(2): 236-237.
CHEN Lei. Nutritional functions and process utilizations of oat[J]. Food & Machinery, 2012, 28(2): 236-237.

[11] AHMAD A, ANJUM F M, ZAHOR T, et al. Beta glucan: A valuable functional ingredient in foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2012, 52(3): 201-212.

[12] LINDA B, LILIANE T, STÉPHANE I, et al. Tailoring rice flour structure by rubbery milling for improved gluten-free baked goods[J]. Food & Function, 2018, 9(5): 2 951-2 961.

[13] MA Lei, LI Bin, HAN Fen-xia, et al. Evaluation of the chemical quality traits of soybean seeds, as related to sensory attributes of soymilk[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 694-701.

[14] PENG Xing-yun, WANG Ya-hui, XING Ji-yun, et al. Characterization of particles in soymilks prepared by blanching soybeans and traditional method: A comparative study focusing on lipid-protein interaction[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 1-7.

[15] WOOJEONG K, YONG W, CORDELIA S. Dairy and plant proteins as natural food emulsifiers[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 261-272.

[16] 张晶, 张美莉. 超高压处理对燕麦淀粉颗粒特性、热特性及流变学特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 114-121.
ZHANG Jing, ZHANG Mei-li. Effect of high hydrostatic pressure treatment on morphological, thermal and rheological properties of oat starch[J]. Food Science, 2020, 41(23): 114-121.

[17] 汪志宇. 动态高压微射流改性膳食纤维对大米淀粉理化性质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
WANG Zhi-yu. Effect of dietary fiber modified by dynamic high pressure microfluidization on physicochemical properties of rice starch[D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.

(下转第 240 页)

- bacteriostatic activities of total flavonoids and total sterols in the bamboo shoots of Thunb[J]. *Economic Forest Research*, 2017, 35(3): 179-185.
- [51] SHINNICK F L. FDA letter regarding enforcement discretion with respect to expanded use of an interim health claim rule about plant sterol/stanol esters and reduced risk of coronary heart disease[J/OL]. *Food and Drug Administration*. (2003-02-14) [2021-03-25]. <https://www.fda.gov/>.
- [52] LI Xiu-fen, FU Bai-ting, GUO Juan, et al. Bamboo shoot fiber improves insulin sensitivity in high-fat diet-fed mice[J]. *Journal of Functional Foods*, 2018, 49: 156-172.
- [53] LI Xiu-fen, GUO Juan, JI Kai-long, et al. Bamboo shoot fiber prevents obesity in mice by modulating the gut microbiota[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1): 112-123.
- [54] CHEN Guang-jing, CHEN Xu-hui, YANG Bing, et al. New insight into bamboo shoot (*Chimonobambusa quadrangularis*) polysaccharides: Impact of extraction processes on its prebiotic activity[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 367-377.
- [55] 于学珍, 马世平, 李海涛, 等. 植物甾醇凝胶促进烧伤创面愈合及抗炎作用[J]. *中国天然药物*, 2007(2): 130-133.
YU Xue-zhen, MA Shi-ping, LI Jin-tao, et al. Promoting action of wound healing and antiinflammation action of phytosterol gel[J]. *Chinese Natural Medicine*, 2007(2): 130-133.
- [56] REN Yan, MA Yi-sha, ZHANG Zhi-dan, et al. Total alkaloids from bamboo shoots and bamboo shoot shells of *Pleioblastus amarus* (Keng) Keng f. and their anti-inflammatory activities [J]. *Molecules*, 2019, 24(15): 1 102-1 114.
- [57] LU Bai-yi, CAI Hua-fang, HUANG Wei-su, et al. Protective effect of bamboo shoot oil on experimental nonbacterial prostatitis in rats[J]. *Food Chemistry*, 2010, 124(3): 1 017-1 023.
- [58] 许丽旋, 蔡建秀. 竹笋壳黄酮提取液抑菌效应初步研究[J]. *世界竹藤通讯*, 2006(4): 29-31.
XU Li-xuan, CAI Jian-xiu. Preliminary study on antimicrobial effect of flavonoids extract from bamboo shoot shell[J]. *World Bamboo & Rattan News*, 2006(4): 29-31.
- [59] 曹张琦. β -谷甾醇协同吉西他滨通过诱导凋亡和抑制上皮间质转化的抗胰腺癌作用研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019: 22-30.
CAO Zhang-qi. Effects of β -sitosterol and gemcitabine on pancreatic cancer by inducing apoptosis and inhibiting epithelial-mesenchymal transformation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019: 22-30.
- [60] LESZEK M, CHRISTIAN G, LEIDY L, et al. Microbiota-directed fibre activates both targeted and secondary metabolic shifts in the distal gut[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1-15.
- [61] TRAMONTIN D, CARRERA S, ASSREUY J, et al. Response surface methodology (RSM) to evaluate both the extraction of triterpenes and sterols from jackfruit seed with supercritical CO₂ and the biological activity of the extracts [J/OL]. *Journal of Food Science and Technology*. (2021-01-04) [2021-03-25]. <https://www.webofscience.com/>.
- [62] BING Li, MAHAM A, ZUHAIR A, et al. Subcritical water extraction of phenolics, antioxidants and dietary fibres from waste date pits[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 8(6): 112-118.
-
- (上接第 6 页)
- [18] 田晓琳. 高压糊化玉米、糯玉米和糜子淀粉重结晶过程中性质和结构变化研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
TIAN Xiao-lin. Retrogradation properties of maize, waxy maize and proso millet starches gelatinized by ultra high pressure[D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2014.
- [19] GOELP K, SINGHALR S, KULKARNIP R. Studies on interactions of corn starch with casein and casein hydrolysates[J]. *Food Chemistry*, 1999, 64(3): 383-389.
- [20] PREECEK E, DROST E, HOOSHYAR N, et al. Confocal imaging to reveal the microstructure of soybean processing materials[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 147: 8-13.
- [21] YOSHIKAWA Y, YASUIKE T, YAGI A, et al. Transverse elasticity of myofibrils of rabbit skeletal muscle studied by atomic force microscopy[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 1999, 256(1): 13-19.
- [22] LIN Song-yi, WANG Jia, ZHAO Ping, et al. Optimized antioxidant peptides fractions preparation and secondary structure analysis by MIR[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2013, 59: 151-157.
- [23] 李媛. 基于 β -乳球蛋白纳米颗粒稳定的高内相 Pickering 乳液的制备、表征与应用[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
LI Yuan. Preparation, characterization and application of high internal phase pickering emulsions stabilized by β -lactoglobulin nanoparticles[D]. Chongqing: Southwest University, 2020.
- [24] WANG Tao, SUN Xiu-hua, ZHOU Zhan-xiang, et al. Effects of microfluidization process on physicochemical properties of wheat bran[J]. *Food Research International*, 2012, 48(2): 742-747.
- [25] CHEN Jia-lun, GAO Dong-xiao, YANG Le-tian, et al. Effect of microfluidization process on the functional properties of insoluble dietary fiber[J]. *Food Research International*, 2013, 54(2): 1 821-1 827.
- [26] 胡志和, 赵旭飞, 鲁丁强, 等. 超高压结合温热处理对脱脂乳透光率和粒径及蛋白溶解性的影响[J/OL]. *食品科学*. (2020-12-07) [2021-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20201207.1017.010.html>.
HU Zhi-he, ZHAO Xu-fei, LU Ding-qiang, et al. Effects of ultra-high pressure combined with mild heat treatment on light transmittance and particle size and protein solubility of skim milk[J/OL]. *Food Science*. (2020-12-07) [2021-07-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20201207.1017.010.html>.