

动态高压微射流处理对方竹笋膳食纤维理化及结构特性的影响

Effect of dynamic high-pressure micro-fluidization treatment on physicochemical and structural properties of square bamboo shoots dietary fiber

汤彩碟^{1,2}

张甫生^{1,2}

杨金来³

吴良如³

郑炯^{1,2}

TANG Cai-die^{1,2} ZHANG Fu-sheng^{1,2} YANG Jin-lai³ WU Liang-ru³ ZHENG Jiong^{1,2}

(1. 西南大学食品科学学院, 重庆 400715; 2. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心

(西南大学), 重庆 400715; 3. 国家林业和草原局竹子研究开发中心, 浙江 杭州 310012)

(1. College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Food Science and Engineering Education [Southwest University], Chongqing 400715, China; 3. China National Bamboo Research Center, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

摘要:以方竹笋中提取的膳食纤维为研究对象,采用动态高压微射流(dynamic high-pressure micro-fluidization, DHPM)在不同压力条件(0, 50, 100, 150, 200 MPa)下进行处理,探究其对竹笋膳食纤维(bamboo shoots dietary fiber, BSDF)理化及结构特性的影响。结果表明,随着处理压力的增大,BSDF 粒径先增大后减小,当处理压力为 150 MPa 时,粒径最小,为(370±11) nm,此条件下 BSDF 的持水力、持油力和膨胀力达到最大,较对照组分别提高了 47.74%, 50.54%, 61.27%, 且差异显著($P < 0.05$)。红外光谱分析表明 DHPM 处理不会改变 BSDF 的官能团,但会使 BSDF 内部的部分氢键断裂和半纤维素、木质素等发生降解;X 射线衍射和热重分析表明 DHPM 处理不会引起 BSDF 的晶体结构改变,但晶体有序度会下降,进而导致其热稳定性降低;微观结构分析显示 DHPM 处理会使 BSDF 颗粒尺寸减小、表面粗糙、组织松散,且当处理压力为 200 MPa 时,颗粒发生团聚。综上,DHPM 可以有效改善 BSDF 的理化性质,在膳食纤维改性方面具有一定的应用价值。

关键词:动态高压微射流;方竹笋;膳食纤维;粒径;微观结构

Abstract: To explore the effect on the physicochemical and structural properties of the bamboo shoots dietary fiber (BSDF), square bamboo shoots dietary fiber was used as raw material to obtain BSDF with different pressure (0, 50, 100, 150, 200 MPa) by dynamic high pressure micro-fluidization (DHPM) treatment. Results showed that as the treatment pressure increases, the particle size of BSDF firstly increased and then decreased. When the treatment pressure was up to 150 MPa, the particle size reached the minimum (370 ± 11) nm. The water holding capacity, oil holding capacity and swelling capacity reached the maximum, which were increased by 47.74%, 50.54% and 61.27% respectively, compared with the untreated group. Infrared spectroscopy analysis showed that the main functional groups of BSDF did not change after DHPM treatment, but the hemicellulose and lignin inside the BSDF degraded and some hydrogen bonds broken. The X-ray diffraction and thermal gravity analysis showed the crystal structure of BSDF did not change, however, the crystal order decreased, which lead to a decrease in its thermal stability. Microstructure analysis showed that DHPM treatment reduced the size of BSDF particles, roughened the surface, and loosened the structure. And when the processing pressure increased to 200 MPa, the particles agglomerated. Above results shows that DHPM can effectively improve the physicochemical properties of BSDF and has certain application value in modification of dietary fiber.

Keywords: dynamic high-pressure micro-fluidization; square bamboo shoots; dietary fiber; particle size; microstructure

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(编号: cstc2020jcj-msxmX0392);贵州省特色林业产业研发项目(编号: 特林研 2020-28);中央高校基本科研业务费重点项目(编号: XDJK2020B045)

作者简介:汤彩碟,女,西南大学在读本科生。

通信作者:吴良如(1965—),男,国家林业和草原局竹子研究开发中心研究员,学士。E-mail: bamshoots@163.com

郑炯(1982—),男,西南大学副教授,博士。

E-mail: zhengjiong_swu@126.com

收稿日期:2020-12-31

方竹(*Chimonobambusa quadrangularis*)属禾本科竹亚科寒竹属植物,方竹属有 15 种,主要分布于中国、日本、印度和马来西亚等地,在中国有 4 种。其中,被誉为“世界一绝、中国独有”的金佛山方竹是世界竹类中的特有品种,集中分布于海拔较高的重庆市南川区和万盛经济开发区、贵州省桐梓县近邻的金佛山林区以及云南省镇雄县^[1]。方竹笋因其形态方正,肉厚鲜美,营养丰富,被誉为“竹笋之冠”^[2],其富含蛋白质、氨基酸、膳食纤维、维生素、矿物质等营养成分^[3]。研究^[4]表明,竹笋膳食纤维(bamboo shoot dietary fiber, BSDF)的摄入可以降低患高血压、糖尿病、肥胖症和某些胃肠道疾病的风险。Elleuch 等^[5]研究表明 BSDF 可以改善乳制品的口感,提高其黏度;郑炯等^[6]研究发现添加 BSDF 可以有效改善黄桃果酱的质地和颜色,赋予其更好的涂抹性;Nirmala 等^[3]发现 BSDF 可以提高食物的持水力、持油力和膨胀力等。然而,BSDF 中不溶性膳食纤维含量高达 92%^[7],作为食品功能性配料添加时可能会对食品的颜色、质地、口感等产生不利影响^[8]。近年来,为了提升 BSDF 品质,拓展其应用范围,国内外研究人员先后采用酸碱法^[9]、生物酶法^[10-11]和物理机械法^[12]等方法对其进行改性,其中,物理改性是一种高效、快捷、绿色环保的 BSDF 改性方法。

动态高压微射流(dynamic high pressure micro-fluidization, DHPM)技术是一种新兴的物理改性方法,可对流体混合物料进行强烈剪切、高速撞击、压力瞬时释放、高频振荡、膨爆和气穴等一系列综合作用,从而起到很好的超微化、微乳化和均一化效果^[13]。研究^[14-15]发现,DHPM 可以有效改善膳食纤维水化性能,均匀分散纤维颗粒,使其组织松散、提高透光率,以及减弱膳食纤维分子内的氢键作用降低其结晶度等。江文韬等^[16]采用 DHPM 改性百香果壳膳食纤维后,其膳食纤维二次粒度显著降低,达到了微米级水平;曹慧慧等^[17]发现 DHPM 处理可以提高玉米芯膳食纤维的溶解性、持水力、持油力、膨胀力和抗氧化等特性;Cheng 等^[18]研究发现利用 DHPM 处理豆渣淀粉的不溶性膳食纤维,能有效减小其粒径,诱导膨化形态,提高其持水力。研究拟采用 DHPM 处理从方竹笋中提取 BSDF,测定处理前后 BSDF 粒径、持水力、膨胀力等理化性质,同时利用红外光谱仪、热重分析仪、扫描电镜等手段表征处理前后其官能团特性、热稳定性和微观形态等变化,以期对 BSDF 的改性提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜方竹笋:重庆市南川金佛山;

木瓜蛋白酶:800 U/mg,上海源叶生物科技有限

公司;

金龙鱼葵花籽食用植物调和油:市售;

KBr:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

数显恒温水浴锅:HH-ZK8 型,巩义市予化仪器有限责任公司;

中草药粉碎机:FW135 型,天津市泰斯特仪器有限公司;

超高压均质机:Scientz-207A 型,宁波新芝生物科技有限公司;

超微流动态高压纳米分散机:M-110EH-30 型,加拿大 Microfluidics 公司;

ZS 粒度分析仪:Zetasizer Nano 型,英国马尔文仪器有限公司;

冷冻干燥机:SCIENTZ-10ND 型,宁波新芝生物技术有限公司;

傅里叶红外光谱仪:Spectrum100 型,美国 PerkinElmer 公司;

X 射线衍射分析仪:XRD-7000 型,日本岛津公司;

热重分析仪:TGA55 型,美国 TA 公司;

扫描电镜:ProX 型,荷兰 Phenom World 公司。

1.3 样品处理

1.3.1 预处理 取新鲜方竹笋,剥皮去壳,洗净切片,沸水漂烫 7 min,60 °C 下烘干,粉碎过 80 目筛,得到方竹笋粉,备用。

1.3.2 竹笋膳食纤维(BSDF)粉末制备 取一定量方竹笋粉,加入木瓜蛋白酶 800 U/g,料液比($m_{\text{方竹笋粉末}}:V_{\text{水}}$)1:20 (g/mL),55 °C 酶解 2 h,沸水灭酶 10 min,用蒸馏水清洗后过滤,收集滤渣,冷冻干燥,粉碎得 BSDF 粉末。

1.3.3 BSDF 改性 取 BSDF 粉末过 200 目筛,以料液比($m_{\text{BSDF粉末}}:V_{\text{水}}$)1:100 (g/mL)加蒸馏水混匀,于磁力搅拌器下分散 30 min,25 °C 高压均质机预处理两次。将预处理溶液分别于 50,100,150,200 MPa 微射流压力下均质处理 5 次,处理过程中开启微射流冷却系统保持温度为 25 °C,以未进行高压微射流处理的样品为对照(CK)。收集均质后的溶液,每个样品分别取 10 mL 用于粒径分布测定,其余溶液冷冻干燥,研磨成粉进行理化性质和结构的测定。

1.4 理化性质测定

1.4.1 粒径测定 根据文献^[11]。

1.4.2 持水力 参照 Chen 等^[19-20]的方法并修改。取 0.5 g 经 DHPM 处理过的 BSDF 粉末于离心管中,加入 20 mL 蒸馏水,混匀,室温放置 6 h,4 500 r/min 离心 15 min,收集沉淀物称重。按式(1)计算其持水力。

$$C_{\text{WH}} = \frac{m_3 - (m_1 + m_2)}{m_1}, \quad (1)$$

式中:

C_{WH} ——持水力, g/g;

m_1 ——BSDF 粉末质量, g;

m_2 ——离心管质量, g;

m_3 ——沉淀物重量, g。

1.4.3 持油力 参照 Chen 等^[19-20]的方法并修改。取 0.5 g 经 DHPM 处理过的 BSDF 粉末于离心管中, 加入 20 mL 食用油, 混匀, 室温放置 6 h, 4 500 r/min 离心 15 min, 用滤纸吸干 BSDF 表面多余的油脂, 收集沉淀物称重。按式(2)计算其持油力。

$$C_{OH} = \frac{m_4 - (m_1 + m_2)}{m_1}, \quad (2)$$

式中:

C_{OH} ——持油力, g/g;

m_1 ——BSDF 粉末质量, g;

m_2 ——离心管质量, g;

m_4 ——沉淀物重量, g。

1.4.4 膨胀力 参照 Chen 等^[19-20]的方法并修改。取 0.3 g 经 DHPM 处理过的 BSDF 粉末, 于 10 mL 量筒中, 读取体积, 再加入 8 mL 蒸馏水, 振荡混匀, 静置 24 h 后读取体积。按式(3)计算其膨胀力。

$$C_S = \frac{V_2 - V_1}{m}, \quad (3)$$

式中:

C_S ——膨胀力, mL/g;

m ——BSDF 粉末质量, g;

V_1 ——BSDF 粉末体积, mL;

V_2 ——BSDF 粉末吸水后体积, mL。

1.5 结构测定

1.5.1 红外光谱分析 参照汪楠等^[11]的方法。

1.5.2 X 射线衍射(XRD) 参照万婕等^[13]的方法。采用步进扫描法, 靶: Cu-K α , 角度步长 0.02°, 工作电压 40 kV, 电流 40 mA, 扫描范围 5°~60°, 扫描速率 6(°)/min。根据分峰法计算相对结晶度。

1.5.3 热重分析 参照汪楠等^[11]的方法。

1.5.4 微观结构 将 BSDF 粉末固定于双面导电样品台上, 喷涂金层使其具有导电性, 然后用扫描电镜观察样品的微观结构。扫描电镜电压 10 kV, 放大倍数 1 000 倍。

1.6 数据处理

采用 Excel 2016 软件进行数据处理, 结果用 $\bar{x} \pm s$ 表示; 运用 Origin 2019 软件绘图; 运用 SPSS 21.0 软件中的 Duncan 法进行差异显著性分析, $P < 0.05$ 为差异显著; 所有试验均重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 对 BSDF 理化性质的影响

2.1.1 粒径分布 BSDF 粒径是影响其持水力、持油力和

膨胀力大小的关键因素^[21]。由表 1 可知, DHPM 处理能显著影响 BSDF 粒度分布和平均粒径($P < 0.05$)。当处理压力为 0~150 MPa 时, 随着处理压力的增大, $d_{0.1}$ 、 $d_{0.5}$ 、 $d_{0.9}$ 所对应的粒径分别由 (297 ± 43) 、 $(1\ 986 \pm 315)$ 、 $(3\ 606 \pm 530)$ nm 减小至 (143 ± 24) 、 (578 ± 67) 、 $(1\ 493 \pm 220)$ nm, 差异显著($P < 0.05$), 表明 BSDF 粒径分布更为集中, 同时 BSDF 的平均粒径也显著减小($P < 0.05$)。当处理压力为 150 MPa 时, BSDF 平均粒径达到最小, 为 (370 ± 11) nm, 比未处理样品下降了 58.70%。这可能是 DHPM 的强烈剪切、高速冲击和高频振动等作用使物料颗粒被膨化和细化^[22], 导致颗粒均一、分布集中且平均粒径减小。当处理压力为 200 MPa 时, BSDF 平均粒径反而增大 (532 ± 2) nm, 与 Liu 等^[23]的结论一致, 这可能是当颗粒粒径减小, 比表面积增大时, 其表面的范德华力和静电吸引力也随之增大, 颗粒之间因为吸引力的增大而重新聚集^[23]。

表 1 DHPM 处理对 BSDF 粒径分布的影响[†]

Table 1 Effect of DHPM treatment on BSDF particle size distribution

处理压力/MPa	$d_{0.1}/\text{nm}$	$d_{0.5}/\text{nm}$	$d_{0.9}/\text{nm}$	D_z/nm
CK	297 ± 43^a	$1\ 986 \pm 315^a$	$3\ 606 \pm 530^a$	896 ± 50^a
50	225 ± 28^b	827 ± 126^b	$2\ 818 \pm 413^a$	649 ± 23^b
100	162 ± 35^c	608 ± 97^c	$1\ 560 \pm 243^{bc}$	468 ± 20^{cd}
150	143 ± 24^c	578 ± 67^c	$1\ 493 \pm 220^c$	370 ± 11^d
200	191 ± 25^c	804 ± 83^b	$1\ 913 \pm 168^b$	532 ± 22^c

[†] $d_{0.1}$ 、 $d_{0.5}$ 、 $d_{0.9}$ 分别表示粉末粒径累计分布达到 10%、50%、90% 时对应的粒径值; D_z 表示粉末的平均粒径; 字母不同表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.1.2 持水力、持油力和膨胀力 由表 2 可知, 随着处理压力的增大, BSDF 的持水力、持油力和膨胀力先增大后减小, 当处理压力为 150 MPa 时, BSDF 的持水力、持油力和膨胀力均达最大值, 分别为 (13.46 ± 0.45) g/g、 (9.77 ± 0.11) g/g 和 (7.87 ± 0.76) mL/g, 较未处理组分别提高了 47.74%、50.54%、61.27%, 差异显著($P < 0.05$)。这与涂宗才等^[24]的结果相似。当处理压力为 200 MPa 时, 持水力、持油力和膨胀力均有不同程度的减小。

持水力和膨胀力一般与样品的密度、亲水基团的暴露程度和表面孔隙率有关。当处理压力为 0~150 MPa 时, 纤维物料在动态高压微射流均质机的撞击腔内被分散为多股细流, 并在极小的空间内发生强烈的高速撞击, 撞击过程中大量动能会瞬间转化为热能等其他形式的能量, 从而产生巨大的压力差作用, 使物料颗粒发生细化膨化作用^[13], 导致 BSDF 比表面积增大, 组织更加疏松, 更多的亲水基团暴露, 水合性提高^[25]。持油力一般取决于

表 2 DHPM 处理对 BSDF 持水力、持油力和膨胀力的影响[†]
Table 2 Effects of DHPM treatment on the WHC, OHC and SC of BSDF

处理压力/ MPa	持水力/ (g · g ⁻¹)	持油力/ (g · g ⁻¹)	膨胀力/ (mL · g ⁻¹)
CK	9.11 ± 0.13 ^d	6.49 ± 0.78 ^c	4.88 ± 0.67 ^c
50	10.98 ± 0.52 ^c	7.55 ± 0.23 ^{bc}	5.26 ± 0.52 ^{bc}
100	11.65 ± 0.58 ^{ab}	9.65 ± 0.49 ^a	6.27 ± 0.54 ^b
150	13.46 ± 0.45 ^a	9.77 ± 0.11 ^a	7.87 ± 0.76 ^a
200	10.71 ± 0.21 ^c	8.09 ± 0.58 ^b	6.38 ± 1.10 ^{ab}

[†] 字母不同表示各处理间差异显著($P < 0.05$)。

BSDF 表面性质、颗粒间的疏水性等^[26],DHPM 处理使 BSDF 粒径减小,比表面积增大,组织疏松、孔隙率提高,持油力提高。而当处理压力为 200 MPa 时,BSDF 粒径减小,比表面积增大,同时表面的范德华力和静电吸引力也增大,颗粒发生团聚,其对水分和油脂的束缚减小,水合性质和持油力均有所下降^[27]。研究^[28]表明,较高的持水力、持油力和膨胀力可以改善食品的黏度和质地,与促进肠道蠕动、降低胆固醇和降血糖等多种功能特性有关。宋玉等^[29]研究发现改性后的 BSDF 可改善香肠中脂肪含量过高的缺点,并提高香肠中的蛋白质和水分含量。因此,在一定处理压力范围内,可利用 DHPM 改性 BSDF,使其作为功能性配料被应用于肉制品、面制品、果蔬制品等食品中。

2.2 对 BSDF 结构特征的影响

2.2.1 红外光谱分析 由图 1 可知,DHPM 处理后样品整体的峰型和位置与 CK 相比未出现较大差异,说明 DHPM 处理后 BSDF 的官能团未发生变化,但是部分吸收峰的强度有变化。912 cm⁻¹ 处是 β -糖苷键的特征吸收峰^[30],1 041~1 192 cm⁻¹ 区域代表纤维素、木质素和残余半纤维素的 C—O 拉伸带和变形带^[31],经 DHPM 处理后,两处吸收峰的峰强度均略减弱,这可能与 DHPM 处理后 BSDF 内部的大分子物质木质素和半纤维素部分降解为多糖等小分子物质有关^[32]。1 478 cm⁻¹ 处是由 N—H 的弯曲振动引起的吸收峰,是木质素中的苯环的特征峰;1 649 cm⁻¹ 处是由 C=O 的非对称伸缩振动所引起的^[26];2 929 cm⁻¹ 处出现的吸收峰是 BSDF 分子中的甲基和亚甲基上 C—H 的收缩振动产生的^[26],DHPM 处理后此处峰强度略有减弱,这可能是处理过程中 DHPM 的剪切应力和空穴作用力显著增强,使物料分子发生剧烈破碎^[33],从而使其部分纤维素链内氢键断裂和亚甲基部分遭到破坏,晶体有序度下降。BSDF 在 3 200~3 400 cm⁻¹ 区域有较宽的吸收峰,是由纤维素和半纤维素 O—H 的伸缩振动引起^[34],经 DHPM 处理后,此处峰强度减弱,这可能是 DHPM 处理使半纤维素分子

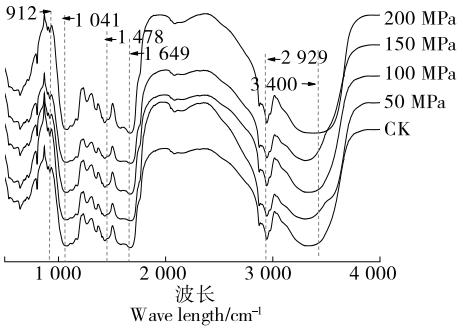


图 1 DHPM 处理 BSDF 的红外光谱图

Figure 1 FTIR spectra of BSDF treated by DHPM

间的部分氢键断裂所引起的。综上,DHPM 处理对 BSDF 的红外特征吸收峰的峰强度有显著影响,可降解 BSDF 内木质素和半纤维素等大分子,引起 BSDF 晶体有序度下降。

2.2.2 X-射线衍射分析 纤维类物料的持水力、持油力、膨胀力等与其内部的晶体结构密切相关^[32]。由图 2 可知,当衍射角为 14°~24°时,BSDF 有明显的衍射峰,主衍射峰在 22°处,表明 BSDF 呈典型的纤维素和半纤维素晶体结构,且 DHPM 处理后,BSDF 衍射峰的位置与未处理样品基本一致,说明 DHPM 处理不会改变 BSDF 的晶体结构。比较 BSDF 的相对结晶度(RC)可知,随着 DHPM 处理压力的增大,BSDF 的 RC 有明显的减小,当处理压力为 150 MPa 时,RC 由未处理的 45.96% 减小至 37.38%。研究^[15]表明,纤维类样品中同时存在结晶区和非结晶区,结晶区结构致密、分子取向良好,非结晶区氢键结合量少、分子排列无序。DHPM 强烈的剪切空穴作用使 BSDF 物料细化膨化,纤维素分子之间的氢键断裂,内部结构变得松散,部分结晶区转化为无序的非结晶区,BSDF 结晶度减小,晶体有序度下降。

2.2.3 热重分析 由图 3 可知,BSDF 的热分解过程大致由 3 个阶段组成。第 1 个热分解阶段是水分挥发阶段,

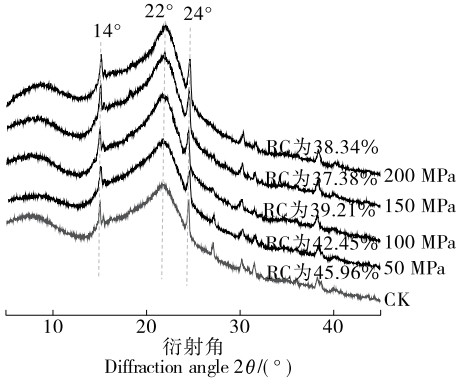


图 2 DHPM 处理 BSDF 的 X-射线衍射图

Figure 2 X-ray diffraction diagrams of BSDF treated by DHPM

温度为 40~100 °C, BSDF 分子失去游离水、物理吸附水和分子内部的结晶水, 温度较低时 BSDF 主要失去易蒸发流失的游离水^[35], 因此在 50 °C 左右失重速率达到该阶段的最大。第 2 个失重阶段发生在 200~350 °C, 是热分解过程的主要阶段, BSDF 的主要组成成分纤维素、半纤维素和木质素通过各种自由基反应和重排反应进一步降解成低分子量的挥发性产物^[36]; 此温度范围内 BSDF 的失重率和失重速率显著增大, 在 300 °C 左右有明显的失重峰; 且随着处理压力的增大, BSDF 在该过程的失重速率和失重率先增加后减少, 当处理压力为 150 MPa 时, 失重速率和失重率均达最大, 4.81%/°C 和 48.98%。结合图 1 和图 2 分析, 可能是由于 DHPM 处理后, BSDF 内部分的糖苷键、氢键等断裂, 减少了热分解断键时所需的能量^[30]。同时 DHPM 处理后 BSDF 粒径分布更集中且平均粒径显著减小 ($P < 0.05$), 颗粒受热更均匀, 热分解速率加快。当温度 > 350 °C 时, BSDF 进入第 3 个热分解阶段, 此阶段中 BSDF 的失重率和失重速率趋于平稳, 焦炭进一步降解, 残渣中的碳含量越来越高, 直至样品热解完全, 反应结束。综上, DHPM 处理使 BSDF 分子内部的分

键断裂, 使其颗粒细化, 降低了 BSDF 的热稳定性。

2.2.4 微观结构分析 由图 4 可知, 未经 DHPM 处理的 BSDF 呈片状结构, 表面光滑, 存在少量的裂隙, 颗粒较大且形状不一。而经 DHPM 处理后, BSDF 表面开始变得粗糙, 部分发生断裂和破碎, 颗粒分布更加均匀, 且随着处理压力的增大, 颗粒尺寸先增大后减小。这可能是 DHPM 强烈不规则的剪切、空穴等作用使 BSDF 内部的氢键等断裂, 分子量减小, 组织松散, 比表面积增大, 更多基团得以暴露, 其理化性质得到改善, 与持水力、持油力和膨胀力结果分析一致。但当处理压力为 200 MPa 时, BSDF 颗粒尺寸反而明显增大, 可能与 DHPM 处理后 BSDF 表面活性改变和吸附性增大有关^[31]。

3 结论

研究了不同压力动态高压微射流处理对竹笋膳食纤维理化及结构特性的影响。结果表明, 经动态高压微射流处理后, 竹笋膳食纤维粒径显著减小 ($P < 0.05$), 持水力、持油力和膨胀力均得到明显提高, 当处理压力为 150 MPa 时效果最佳。通过红外光谱、X 射线衍射、热重

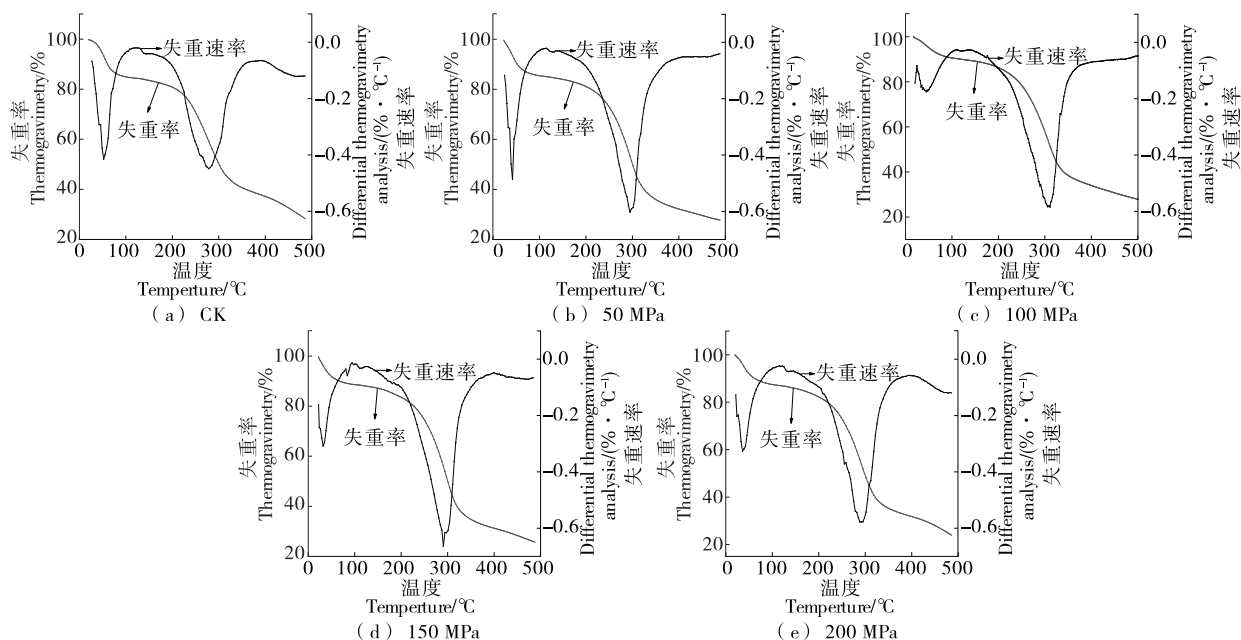


图 3 DHPM 处理 BSDF 的热重分析图

Figure 3 Thermal analysis of BSDF treated by DHPM

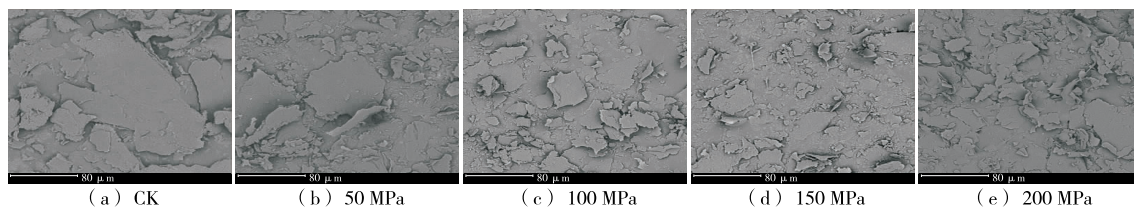


图 4 DHPM 处理 BSDF 的 SEM 图

Figure 4 Scanning electron microscope (SEM) images of BSDF treated by DHPM ($\times 1\,000$)

和扫描电镜分析,经动态高压微射流处理后,竹笋膳食纤维呈片状结构,表面粗糙,组织疏松,晶体有序度下降,热稳定性降低。综上,动态高压微射流处理可以有效改善竹笋膳食纤维的理化和结构特性,是一种有效的物理改性方法。

参考文献

- [1] 李伟. 金佛山方竹笋产业发展思考[J]. 南方农业, 2013, 7(7): 67-68.
- [2] 鲍丽然, 贾中民, 李瑜, 等. 南川金佛山方竹笋营养安全品质和立地土壤评价[J]. 物探与化探, 2018, 42(5): 1 089-1 094.
- [3] NIRMALA C, BISHT M S, LAISHRAM M. Bioactive compounds in bamboo shoots: Health benefits and prospects for developing functional foods[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2014, 49(6): 1 425-1 431.
- [4] 王艳峰, 杨锡洪, 曹峻嵩, 等. 膳食纤维调节 2 型糖尿病血糖作用研究进展[J]. 食品与机械, 2020, 36(10): 6-11, 17.
- [5] ELLEUCH M, BEDIGIAN D, ROISEUX O, et al. Dietary fiber and fiber-rich by-products of food processing: Characterization, technological functionality and commercial applications: A review [J]. Food Chemistry, 2011, 124: 411-421.
- [6] 郑炯, 陈琪, 曾瑞琪, 等. 竹笋膳食纤维对黄桃果酱品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 177-184.
- [7] GHADA A S. Dietary fiber, atherosclerosis, and cardiovascular disease[J]. Nutrients, 2019, 11(5): 1 155.
- [8] FANG Dong-ya, WANG Qi, CHEN Can-hui. Structural characteristics, physicochemical properties and prebiotic potential of modified dietary fiber from the basal part of bamboo shoot[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2020, DOI: org/10.1111/ijfs.14709.
- [9] 吴丽萍, 金雅娴, 吴家兴. 毛竹笋膳食纤维提取工艺优化[J]. 黄山学院学报, 2017, 19(3): 62-65.
- [10] 王佳, 张颜笑, 郑炯. 酶解处理对方竹笋膳食纤维理化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(9): 104-108.
- [11] 汪楠, 黄山, 张月, 等. 高温蒸煮协同纤维素酶改性竹笋膳食纤维[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(4): 13-18.
- [12] 刘玉凌. 物理改性方竹笋膳食纤维理化性能及结构的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016: 16-17.
- [13] 万婕, 刘成梅, 李俦, 等. 动态高压微射流作用对膳食纤维结晶结构的影响[J]. 高压物理学报, 2012, 26(6): 639-644.
- [14] 熊慧薇. 瞬时高压作用对膳食纤维改性的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2006: 11-13.
- [15] 刘成梅. 瞬时高压作用的机制及杀菌和纤维改性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2006: 13-15.
- [16] 江文韬, 林彤, 陈灿辉, 等. 响应面法优化百香果壳膳食纤维的高压微射流改性工艺[J]. 福建农业科技, 2020(1): 11-16.
- [17] 曹慧慧, 王磊, 赵海涛, 等. 动态高压微射流制备玉米芯可溶性膳食纤维工艺及功能特性研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(7): 175-178.
- [18] LIU Cheng-mei, LIANG Rui-hong, DAI Tao-tao, et al. Effect of dynamic high pressure micro-fluidization modified insoluble dietary fiber on gelatinization and rheology of rice starch[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 57: 55-56.
- [19] CHEN Huan-huan, ZHAO Chun-mei, LI Jie, et al. Effects of extrusion on structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from nodes of lotus root[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 93: 204-211.
- [20] WANG Tao, SUN Xiu-hua, ZHOU Zhan-xiang, et al. Effects of micro-fluidization process on physicochemical properties of wheat bran[J]. Food Research International, 2012, 48(2): 742-747.
- [21] DUBEY R, TOH Y R, YEH A I. Enhancing cellulose functionalities by size reduction using media-mill[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 11343.
- [22] 陈媛. 微生物发酵和动态超高压微射流技术对膳食纤维的性质和结构的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2011: 20-23.
- [23] 丁莎莎, 黄立新, 张彩虹, 等. 高压均质和胶体磨改性对油橄榄果渣水不溶性膳食纤维性能的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(8): 10-13, 18.
- [24] 涂宗财, 陈丽莉, 王辉, 等. 发酵与动态高压微射流对豆渣膳食纤维理化特性的影响[J]. 高压物理学报, 2014, 28(1): 113-119.
- [25] 王欢, 佟晓红, 刘龄, 等. 高压微射流对生物解离大豆膳食纤维特性的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 346-352.
- [26] 王庆玲, 朱莉, 孟春棉, 等. 番茄皮渣膳食纤维的理化性质及其结构表征[J]. 现代食品科技, 2014, 30(11): 60-64.
- [27] 李安平, 谢碧霞, 钟秋平, 等. 不同粒度竹笋膳食纤维功能特性研究[J]. 食品工业科技, 2008(3): 83-85.
- [28] DONG Ji-lin, WANG Lei, LU Jing, et al. Structural, antioxidant and adsorption properties of dietary fiber from foxtail millet (Setaria italica) bran [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(8): 3 886-3 894.
- [29] 宋玉. 竹笋膳食纤维的改性及在中式香肠中的应用研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018: 51-52.
- [30] KABR M M, WANG H, LAU K T, et al. Effects of chemical treatments on hemp fiber structure[J]. Applied Surface Science, 2013, 276: 13-23.
- [31] 游玉明, 王昱圭, 张洁, 等. 高压均质处理对方竹笋膳食纤维理化性质及结构的影响[J/OL]. 食品与发酵工业. (2020-12-08) [2020-12-10]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025880>.
- [32] SONG Yu, SU Wei, MU Ying-chun. Modification of bamboo shoot dietary fiber by extrusion-cellulase technology and its properties[J]. International Journal of Food Properties, 2018, 21(1): 1 219-1 232.
- [33] 刘伟, 李火坤, 刘成梅, 等. 基于 FLUENT 的动态高压微射流内部孔道流场的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2012, 26(1): 113-120.
- [34] 李璐, 黄亮, 苏玉, 等. 超微化雷竹笋膳食纤维的结构表征及其功能特性[J]. 食品科学, 2019, 40(7): 74-81.
- [35] 王威岗, 韦杰, 董长青. 木质纤维热解的热重和反应动力学研究[J]. 可再生能源, 2007(5): 23-26.
- [36] 张洪勋, 李林. 纤维素类生物质热解技术研究进展[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2004(1): 16-19.