

不同处理方式对柑橘纤维形态结构的影响研究

曾伟奇¹, 廖劲松², 齐军茹¹

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 濮阳市味博生物技术有限公司, 河南濮阳 457000)

摘要: 本研究探讨了三种柑橘纤维[AQ-Plus (1号), Fiber-Star (2号) 和在我们的实验室中提取的纤维 (3号)]之间基本成分、物理性质(持水性、持油性以及膨胀性)的差异; 通过测定柑橘纤维悬浮液的粒径、Zeta 电位、表观黏度以及微观结构来探讨高压均质、超声波处理对三种柑橘纤维悬浮液的形态表征的影响。实验结果表明: 1号纤维素(38.02±1.61 g/100 g)、半纤维(29.56±0.63 g/100 g)含量较高, 持水性(21.58 g/g)、持油性(14.29 g/g)以及膨胀性(27.46 mL/g)较好, 2号次之, 3号最差; 经过 30 MPa, 60 ℃ 高压均质处理, 三种柑橘纤维粒径降低, Zeta 电位、表观黏度较未处理前显著提升; 随着超声波处理时间的增加, 三种柑橘纤维的粒径逐渐下降, 表观黏度呈现递增的趋势; 在 0~5 min 处理过程中, 三种柑橘纤维悬浮液 Zeta 电位绝对值随着超声波处理时间的增加而显著提高, 随着超声时间的进一步延长, 三种柑橘纤维 Zeta 电位无显著变化。

关键词: 柑橘纤维; 粒径; Zeta 电位; 高压均质; 超声波

文章编号: 1673-9078(2019)02-163-170

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.2.023

Effects of Different Treatments on Morphology of Citrus Fibers

ZENG Wei-qi¹, LIAO Jing-song², QI Jun-ru¹

(1. School of Food Science and Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2. Weibo Biotechnology Co. Ltd., Puyang 457000, China)

Abstract: In this study, the differences in the basic composition and physical properties (water holding capacity, oil holding capacity and swelling property) among the three types of citrus dietary fibers (DFs) (AQ-Plus (No. 1), Fiber-Star (No. 2), and DFs extracted in our laboratory (No. 3) were investigated. The effects of high pressure homogenization and ultrasonic treatment on the morphological characteristics of the three citrus DF suspension solutions were investigated by determining their particle size, zeta potential, apparent viscosity and micro-structure. The experimental results showed that No. 1 had better water holding capacity (21.58 g/g), oil holding capacity (14.29 g/g) and expansibility (27.46 mL/g) attributed to its higher cellulose (38.02±1.61 g/100 g) and hemicellulose (29.56±0.63 g/100 g) contents, with No. 2 ranked the second and No. 3 the worst. After high pressure homogenization (30 MPa, 60 ℃), the three types of citrus fibers had decreased particle size with significantly increased viscosity and improved zeta potential. With the increase of ultrasonic treatment time, the particle size of three kinds of citrus fibers decreased and their apparent viscosity increased. During the treatment of 0~5 min, the absolute value of the zeta potential of the three citrus fibers suspensions increased significantly with the increase of the ultrasonic treatment time. Further increase of the ultrasonic treatment time, the zeta potential of the three citrus fibers suspensions did not change significantly.

Key words: citrus fiber; particle size; zeta potential; high pressure homogenization; ultrasonic treatment

膳食纤维(dietary fiber, DF)是指不能被人体消化酶消化, 也不能被小肠吸收, 但能够被大肠部分或全部分解的一种天然的或天然原料经过简单的处理得到的高分子碳水化合物或聚合物, 包括多糖、寡聚糖、木质素和植物基质^[1]。膳食纤维具有增加饱腹感、提高消化过程、促进排便等作用。由于膳食纤维在医学

收稿日期: 2018-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31370036)

作者简介: 曾伟奇 (1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 柑橘纤维性能表征及其应用

通讯作者: 齐军茹 (1977-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 蛋白质性修饰、功能性多糖制备与应用

和营养学方面的重要作用, 引起了人们持续不断的关注, 被列为继“糖、蛋白质、脂肪、水、矿物质和维生素”之后的“第七大营养素”^[2]。

柑橘纤维是从柑橘皮渣中提取果胶的生产副产物, 迄今为止国内对于柑橘皮提取纤维的产业化还比较薄弱。柑橘果实中的膳食纤维(DF), 尤其是对人体更加有益的水溶性膳食纤维(Water-soluble dietary fiber, SDF)的含量十分丰富。研究发现柑橘纤维具有很强的持水力和持油力, 并且具有抗氧化性的优越功能性^[3-8]。因此, 开发和利用柑橘中的膳食纤维已成为当前研究的热点之一。

目前而言, 对于柑橘纤维的研究主要集中在制备

工艺以及在医疗和食品中的应用方面^[9-12],也有一些研究者对于柑橘纤维的物化性质进行了研究^[13,14]。一些研究人员主要分析了柑橘类水果的 DF 含量^[15],而其他研究者主要关注 DF 成分^[16]。此外, Fernández-López 等人对 DF 的功能特性进行了广泛的评估^[17]。然而,尚未比较来自柑橘类果皮的 DF 的组成和功能特性,以便进一步应用于食品工业。此外,对于采用不同方式处理柑橘纤维的表征基础研究相对来说比较少^[18,19],如能对其性能进行分析研究,拓宽柑橘纤维的应用领域范围,不仅可以解决柑橘加工过程中的环境污染和资源浪费问题,提高副产物的利用价值,而且还可以作为食品加工过程中的功能性配料改善食品的性能。

本文研究了三种不同种类的柑橘纤维的基本成分以及物化性质的差异;通过测定柑橘纤维悬浮液粒径、Zeta 电位、黏度,解析高压均质处理、超声波处理对三种柑橘纤维悬浮液性能、表征的影响,为今后更好的利用柑橘加工副产物柑橘皮渣提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

柑橘纤维 1 号(AQ-Plus),德国 Hberda Food 公司;2 号(Fiber-Star),美国 Fiberstar 公司;3 号,实验室自提。

3 号柑橘纤维提取^[20]:

原料→漂洗→粉碎→碱液(pH 12)浸泡 1 h→漂洗至中性→60℃酸液浸泡 2 h(pH 2)→漂洗至中性→过滤→烘干→磨细→过筛→成品

无水 3,5-二硝基水杨酸(分析纯)、氢氧化钠(分析纯)、盐酸(分析纯),国药集团化学试剂有限公司;咔唑、半乳糖醛酸标准品、酸洗硅藻土、重铬酸钾、2-(N-吗琳代)磺酸基乙烷(MES)、三羟甲基氨基甲烷(TRIS),广州化学试剂厂;热稳定 α-淀粉酶、蛋白酶、淀粉葡萄糖苷酶,美国 Sigma 公司。

1.2 主要仪器设备

Zeta 电位及纳米粒度分析仪(Zano-ZS),英国 Malvern 公司;CR 22G 型高速冷冻离心机,日立(Hitachi)公司;Alpha-4 型冷冻干燥机,德国 Christ 公司;激光动态粒度扫描仪(Nano-ZS),英国 Malvern 公司;F-7000 型紫外分光光度计,日本 Hitachi 公司;HAKKE RS60 流变仪,德国 Thermo 公司;JSM-6380 LV 型扫描电镜,日本电子株式会社;SCIENTZ-IIID 型超声波细胞粉碎机(探头式),上海珂淮仪器有限公司;

司;APV-1000 型高压均质机,丹麦 APV 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 柑橘纤维基本成分测定

蛋白含量测定采用杜马斯定氮仪测定,转换系数 6.25;脂肪含量测定参照 GB/T 5009.6-2003,采用索氏抽提法;灰分含量测定参照 GB 5009.4-2010,样品置于马弗炉中 550℃灰化 4 h,剩余残渣与样品重量比例即为灰分含量;总膳食纤维、不溶性膳食纤维以及水溶性膳食纤维测定参照 AOAC 991.43 方法进行;纤维素、半纤维素及木质素测定参考池宁琳等^[21-23]用的洗涤剂法进行;果胶含量测定参考 GB/T 1.1-2009。

1.3.2 物理性质测定

1.3.2.1 持水性(water holding capacity, WHC)的测定^[24]

准确称取 0.5 g(精确到 0.001 g)柑橘纤维到离心管中,置于 15 mL 离心管中,加入 10 mL 蒸馏水,在室温下静置 24 h,然后离心分离(2000 g, 30 min),倒掉上层液,沥干水分后称重。持水力由以下计算式表示:

$$\text{持水力(WHC)} / (\text{g/g}) = \frac{m_2 - m_1}{m_0}$$

式中: m_2 为样品吸水后与离心管的总质量/g; m_1 为离心管的质量/g; m_0 表示样品的质量。

1.3.2.2 持油性(oil holding capacity, OHC)的测定^[25]:

取 0.5 g 柑橘纤维置于 15 mL 离心管中,加入 10 mL 玉米胚油,混合均匀后静置 1 h, 3500 g 的条件下离心 30 min,弃去上清液,并用滤纸将离心管内壁多余的油脂吸干,静置 5 min,称重。柑橘纤维持油力由以下计算式表示:

$$\text{持油力(OHC)} / (\text{g/g}) = \frac{m_2 - m_1}{m_0}$$

式中: m_2 为样品吸油后与离心管的总质量/g; m_1 为离心管的质量/g; m_0 表示样品的质量。

1.3.2.3 膨胀性(swelling capacity, SWC)的测定^[26]

准确称取样品 0.1 g(精确到 0.001 g)体积记为 V_0 ,置于 10 mL 的量筒中,再加入 5 mL 的蒸馏水,混匀,在室温下静置 24 h,观察记录柑橘纤维最终体积记为 V_1 。柑橘纤维膨胀性由以下计算式表示:

$$\text{膨胀力(SW)} / (m_1 / \text{g}) = \frac{V_1 - V_0}{m_0}$$

式中: V_1 为样品膨胀后的体积/ m_1 ; V_0 为样品膨胀前的体积/g; m_0 表示样品的质量。

1.3.3 柑橘纤维的不同条件处理

悬浮液配制: 1 号、2 号以及 3 号柑橘纤维过 100 目筛后,分别配制成 0.5% 的悬浮液。

高压均质处理: 1号、2号以及3号柑橘纤维过100目筛, 分别配制成0.5%的悬浮液后, 高压均质机(30 MPa, 60 °C)均质两遍, 得到三种柑橘纤维均质后的悬浮液。

超声波处理^[23]: 将过完100目筛后的1号、2号以及3号柑橘纤维分别配制成0.5%的悬浮液, 探头式超声波细胞破碎仪(25 kHz, 450 W)分别处理5 min, 10 min, 15 min, 20 min, 得到超声后三种柑橘纤维的悬浮液。

1.3.4 柑橘纤维粒径分布

将1.3.3中的三种不同处理方式得到的柑橘纤维悬浮液, 采用动态光散射技术, 利用Mastersize 3000激光粒度分析仪测定其粒径分布, 测定温度为室温。参数设置为: 样品类型 非球形, 物质类型 Cellulose, 颗粒折射率 1.4683, 颗粒吸收率 0.01, 分散剂-水, 分散剂折射率 1.330。试验采用d4,3, 即体积平均直径表征待测悬浮液粒度的大小, 每个样品重复3次。

1.3.5 柑橘纤维 Zeta 电位测定^[27-29]

采用 Zeta 电位分析仪测定, 乳液质量浓度为0.5%(W/V), 上样体积 1 mL, 测定温度 25 °C。重复测量3次, 取三次的平均值为最终测定值。

1.3.6 柑橘纤维表观黏度的测定^[30-32]

用胶头滴管吸取1.3.3制备的柑橘纤维悬浮液置于直径为27.83 mm的平板测量台上, 间隙设为1 mm, 测定温度为25 °C。测定样品黏度随剪切速率的变化。

表观黏度的测试模式为控制速率模式, 剪切速率为0.001~100 s⁻¹, 测试时长为300 s, 以线性取点方式采集数据。所有流变测试的数据采用软件 RheoWin 3 Data Manager 进行分析处理。

1.3.7 扫描电镜观察^[33]

柑橘纤维的形态使用日立 S-3700N 型扫描电子显微镜观察。将未处理和高压均质后的柑橘纤维悬浮液稀释2500倍后, 滴加到新剥开的光滑平整的云母片表面上, 在室温下放至通风处干燥24 h。用双面胶布将云母片粘牢在镀金台上, 镀膜(日立 KIKOIB-5)后, 加速电压为10 kV的条件下用扫描电子显微镜观察。

1.3.8 数据统计与分析

每个实验均重复三次, 采用 ANOVA 进行误差分析, 并用 Origin 8.5 统计分析数据并作图。

2 结果与讨论

2.1 三种柑橘纤维基本成分测定

表1比较了三种柑橘纤维的基本成分含量, 结果表明: 不同柑橘纤维在基本成分上存在差异。三种柑橘纤维样品在蛋白质含量上无明显差异, 1号样品与2号、3号相比, 灰分含量较低; 2号样品脂肪含量较高; 总膳食纤维(TDF)含量以及水不溶性膳食纤维(IDF), 2号最低, 分别为75.37 g/100 g、36.75 g/100 g, 但水溶性膳食纤维(SDF)含量最高。Harholt 等^[34]发现果胶具有较高的表观黏度并且能形成凝胶, 对维持柑橘纤维的结构和物化性质有重要的作用, 作为柑橘纤维水溶性膳食纤维主要成分的果胶, 2号柑橘纤维含量为32.6 g/100 g, 明显高于其他两种柑橘纤维; French 等^[31]发现尽管纤维素在水中的溶解度较低, 可是其在水中具有一定的膨胀性, 所以纤维素能吸收较多的水分, 持水性较好, 1号样品中的纤维素(38.02 g/100 g)、半纤维素(29.56 g/100 g)含量跟2号以及3号样对比, 明显较高; 3号样品木质素含量最高。

表1 柑橘纤维基本成分含量(g/100 g)

Table 1 Proximate composition of different citrus fiber (g/100 g)

成分/%	1号	2号	3号
蛋白质	5.83±0.13 ^a	5.74±0.11 ^a	4.79±0.08 ^a
脂肪	0.40±0.081 ^b	1.70±0.052 ^a	0.50±0.417 ^b
灰分	1.32±0.101 ^b	3.01±0.042 ^a	3.62±0.023 ^a
总纤维	90.86±1.53 ^a	75.37±1.01 ^b	89.63±1.21 ^a
水溶性纤维	16.52±0.89 ^c	38.62±1.09 ^a	21.57±0.12 ^b
水不溶性纤维	74.34±2.12 ^a	36.75±0.82 ^c	68.06±0.69 ^b
纤维素	38.02±1.61 ^a	14.96±0.21 ^c	28.48±0.52 ^b
半纤维素	29.56±0.63 ^a	12.91±0.14 ^c	21.33±0.31 ^b
木质素	6.76±0.92 ^b	2.89±0.31 ^c	13.77±0.11 ^a
果胶	15.86±0.45 ^b	32.6±0.59 ^a	15.33±1.32 ^b

注: 同一行中不同小写字母代表不同柑橘纤维之间的显著性差异($p<0.05$)。

2.2 柑橘纤维物理性质测定

由图1可知, 1号、2号以及3号的持水力分别为21.58 g/g, 8.59 g/g, 5.26 g/g, 1号柑橘纤维的持水力远高于其他两种柑橘纤维; 在持油性方面, 1号持油性最高为14.29 g/g, 2号(1.91 g/g)、3号(2.09 g/g)持油性都较低; 膨胀性最高为1号(27.46 mL/g), 2号为16.44 mL/g, 最低为3号(5.73 mL/g)。由此可得, 1号柑橘纤维的物理性能最优, 可能与1号样品中吸水能力较强的纤维素含量较高有关^[35], 其次为2号, 3号物理性能最差。

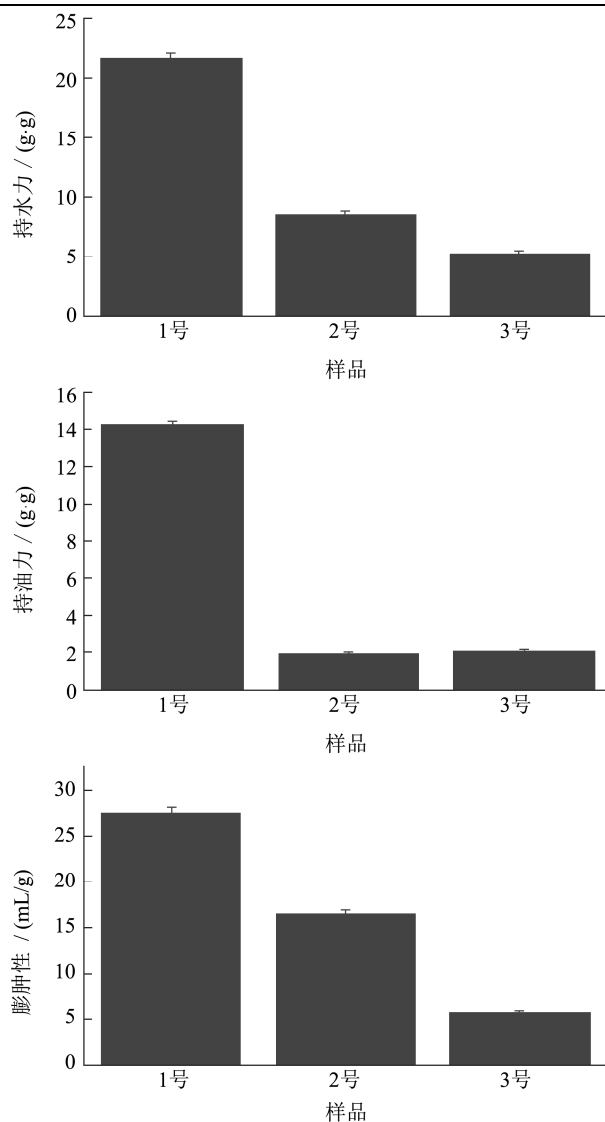


图1 柑橘纤维的物化性质测定结果

Fig.1 Determination results of physical and chemical characteristics of different citrus fiber

2.3 柑橘纤维的结构性能分析

2.3.1 柑橘纤维表观黏度分析

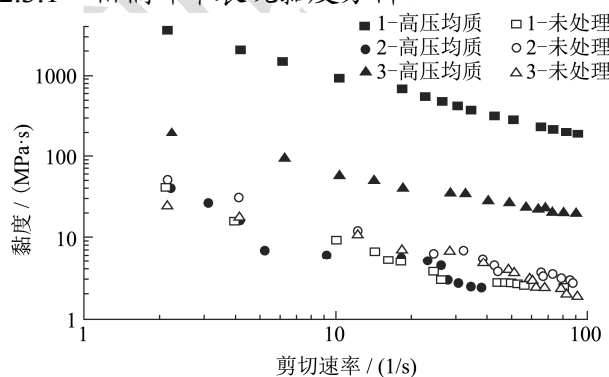


图2 高压均质对柑橘纤维悬浮液的黏度的影响测定结果

Fig.2 Effect of high pressure homogenization on viscosity of different citrus fiber suspension solution

图2为高压均质前后三种柑橘纤维悬浮液的黏度随剪切速率变化图,1号、3号在30 MPa, 60℃均质两遍后,表观黏度均明显增加,2号柑橘纤维悬浮液在均质前后,黏度无明显变化;在高压均质后的柑橘纤维悬浮液中,1号的黏度最高,其次为3号,2号柑橘纤维悬浮液黏度最低。

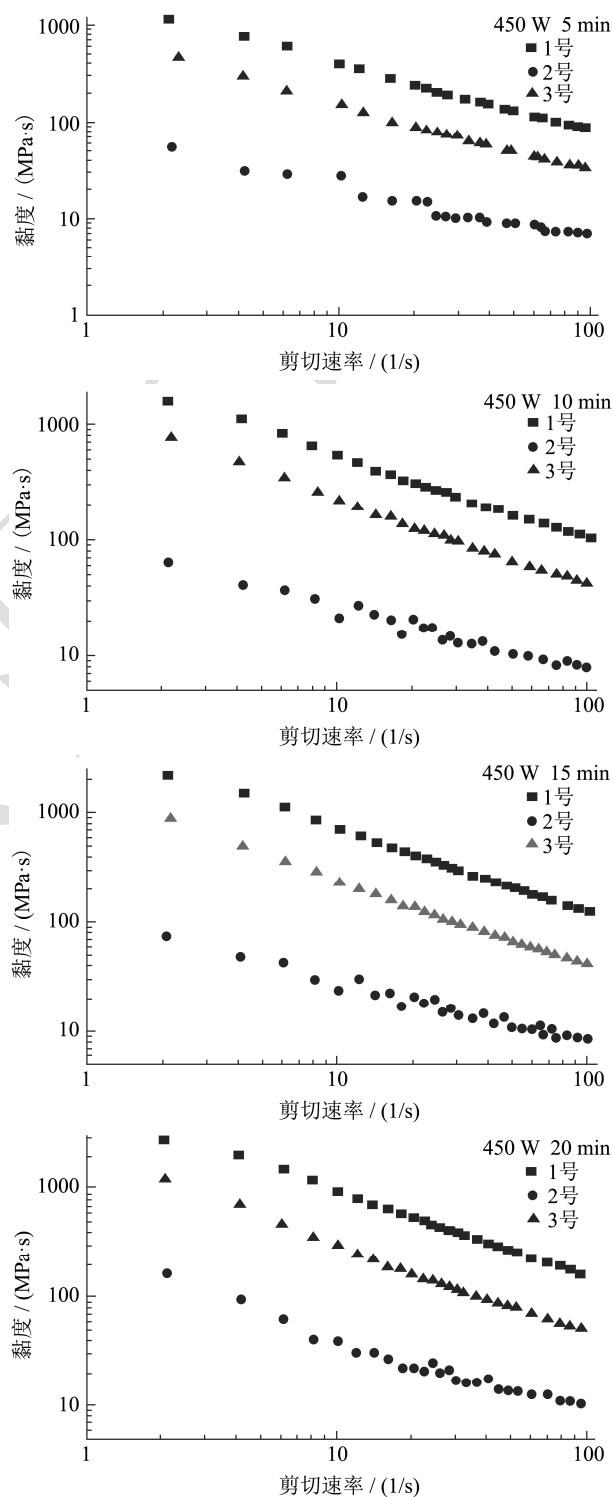


图3 超声波处理对柑橘纤维悬浮液的黏度的影响测定结果

Fig.3 Effect of ultrasound treatment on viscosity of different citrus fiber suspension solution

由图3可知, 5 min至20 min的处理过程中, 三种柑橘纤维的表观黏度均呈现递增的趋势, 并且在此过程中, 1号柑橘纤维悬浮液的黏度最大, 其次为3号, 2号柑橘纤维的表观黏度最小。

综上结果可发现: 在高压均质和超声波处理作用下, 纤维结构受到破坏, 使纤维素和半纤维素中更多的亲水性基团暴露出来, 颗粒与水的接触面积、接触部位增多, 其分散性增强, 分子可以在溶液中以较为伸展的构象存在, 使得溶液的黏度增大^[36]。1号和3号柑橘纤维悬浮液经过高压均质或者超声波处理后, 随着纤维粒径的不断减小, 其致密的组织结构被疏松、颗粒的比表面积、表面能和孔隙率提高^[37]; 2号柑橘纤维悬浮液在高压均质和超声波处理后, 表观黏度与处理前相比, 均无显著变化, 可能与其对维持结构稳定性有重要作用的果胶含量较高有关^[34]。

2.3.2 Zeta 电位

Zeta 电位是一个表征分散体系稳定性的重要参数, 决定了分散体系在应用的环境中是否能够维持较好的稳定性; 一般而言, Zeta 电位的绝对值越大, 说明分散体系的带电量越大, 分子间的相互排斥力也越大, 从而分散体系中的粒子就不容易沉淀聚集^[38]。由图4可知, 高压均质前后, 三种柑橘纤维的 Zeta 电位绝对值都有较大变化, 这可能与高压均质作用下纤维结构受到破坏, 使纤维素和半纤维素中更多的亲水基团暴露出来, 从而使溶液中带电离子总量增加^[39]。高压均质处理后, 1号 Zeta 电位绝对值最大(33.56 mV), 表明高压均质处理后, 1号样品悬浮液稳定性最好。

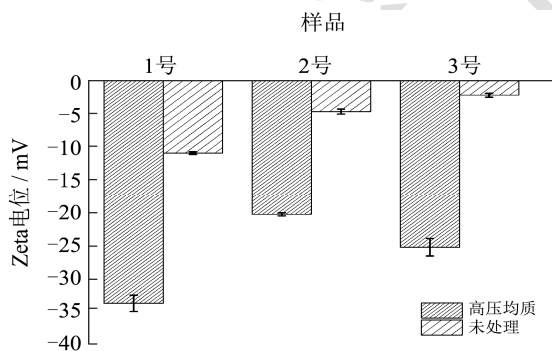


图4 高压均质对柑橘纤维悬浮液的 Zeta 电位的影响测定结果
Fig.4 Effect of high pressure homogenization on zeta potential of different citrus fiber suspension solution

由图5可知, 0~5 min处理过程中, 三种柑橘纤维的 Zeta 电位绝对值随着处理时间的增加而提高, 可能与超声波处理产生的空穴作用有关, 即由于伴随有水力冲击作用的液体连续性的中断作用, 纤维束便会分裂成单根纤维, 纤维细胞受到破坏, 纤维素和半纤维素中的部分亲水性基团游离出来, 因此悬浮液中的

总电荷量增加^[40]; 随着超声时间的增加, 三种柑橘纤维悬浮液的 Zeta 电位绝对值与随着时间的延长变化不大并且开始缓慢下降, 纤维结构基本不再受超声的影响^[39,41,42]。整个处理过程中, 1号样品的 Zeta 电位绝对值始终高于2号和3号, 说明超声波处理后, 1号样品悬浮液稳定性最好, 可能与1号中纤维素和半纤维总含量较高, 超声波处理时, 更多的亲水性基团游离出来, 因此1号悬浮液中的总电荷量较高有关。

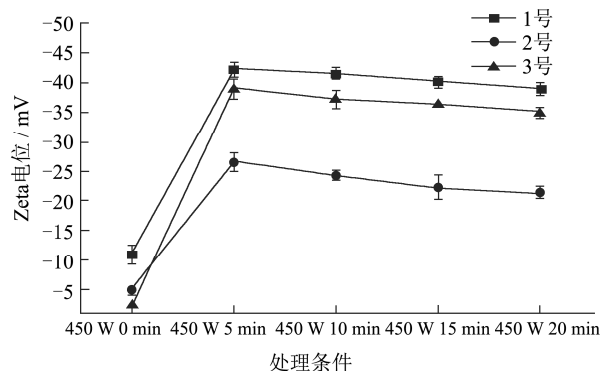


图5 超声波处理对柑橘纤维悬浮液 ζ -电位的影响测定结果
Fig.5 Effect of ultrasound treatment on zeta potential of different citrus fiber suspension solution

2.3.3 柑橘纤维的分子粒径分析

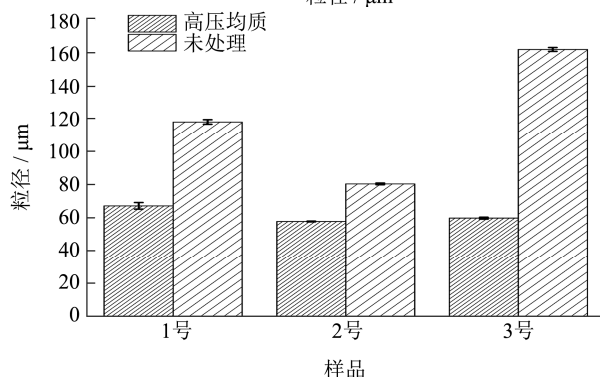
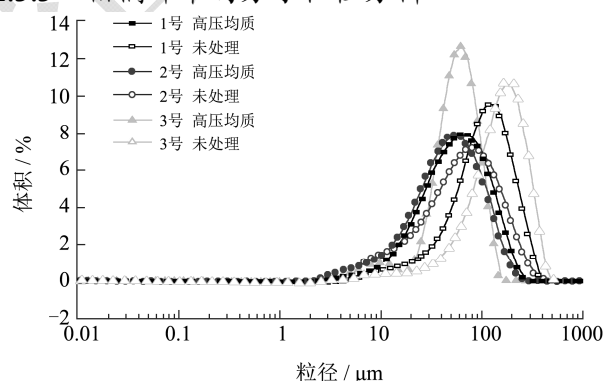


图6 高压均质对柑橘纤维悬浮液的粒径的影响测定结果
Fig.6 Effect of high pressure homogenization on particle size of different citrus fiber suspension solution

图6为三种柑橘纤维高压均质前后的粒径测定结果图, 在高压均质前, 3号柑橘纤维悬浮液的粒径最大(162 μm), 其次为1号(118 μm), 2号柑橘纤维粒径

最小, 为 $80.30\ \mu\text{m}$; 在 $30\ \text{MPa}$, $60\ ^\circ\text{C}$ 高压均质两遍之后, 3 号柑橘纤维悬浮液粒径变化最为显著($162\ \mu\text{m}$ 降至 $59.70\ \mu\text{m}$), 1 号柑橘纤维悬浮液粒径降为 $67.1\ \mu\text{m}$, 2 号柑橘纤维悬浮液变化较小($80.30\ \mu\text{m}$ 降为 $57.7\ \mu\text{m}$); 三种柑橘纤维悬浮液经高压均质处理后, 粒径都呈现下降的趋势。纤维结构可能在高压均质过程中, 受到挤压、剪切和高压释放等机械力作用, 使其微观结构发生变化, 粒径减小, 2 号变化幅度小可能是与其果胶含量较高有关, 由于果胶组分的酸性和带电荷(例如半乳糖醛酸)性质, 它在许多应用中用于其表观粘度或胶凝性质, 因此柑橘纤维中的果胶对维持其结构和物化性质有重要的作用^[43-46]。

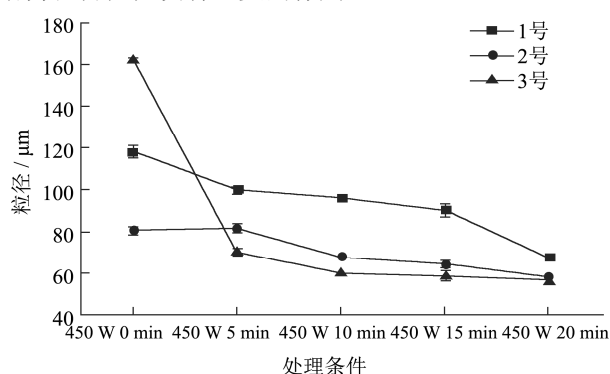


图7 超声波处理对柑橘纤维悬浮液的粒径的影响测定结果

Fig.7 Effect of ultrasound treatment on particle size of different citrus fiber suspension solution

图7为不同超声处理条件对柑橘纤维悬浮液的粒径影响图, 0~20 min 的处理过程中, 三种柑橘纤维悬

浮液的粒径整体均呈现出下降的趋势, 处理 5 min 后, 3 号粒径变化最为明显, 1 号, 2 号粒径变化较小; 超声波处理 5 min 后, 随着处理时间增加, 三种柑橘纤维悬浮液粒径均无明显变化; 当超声波作用于纤维时, 在声空化作用下, 纤维素分子间氢键受到一定程度的破坏, 分子排列规整性减小, 有序状态降低, 结晶度下降, 形态减小, 当纤维分子整体达到一定状态后结构趋于稳定^[39]。与 2 号、3 号相比, 1 号柑橘纤维悬浮液在处理过程中粒径都较大, 可能有两方面原因: 一是悬浮液经过超声波处理, 而使 1 号中含量较高的纤维素和半纤维素中更多亲水性基团暴露出来, 使 1 号吸水能力较强, 因此纤维颗粒吸水膨胀体积变化较大, 二是 1 号悬浮液超声波处理后, 体系中 Zeta 电位较高, 悬浮液分散体系比较稳定, 随着处理时间的增加, 体系受超声波处理的变化更小。

2.3.4 柑橘纤维的表观形态分析

由 SEM 观察到高压均质前后的柑橘纤维的超微结构如图 8 所示, 均可观察到未处理前三种柑橘纤维整体呈现出不规则的片状; 与 2 号以及 3 号相比, 1 号柑橘纤维结构呈现出更为致密的网络状结构, 结构疏松, 推测其具有较大的空隙, 因此增加了比表面积, 使柑橘纤维对液体等物质具有较强的附着及吸附能力。高压均质处理后, 三种柑橘纤维形态均发生变化, 1 号形态呈现出较为饱满的长杆状, 可能与其吸水能力较强有关, 2 号柑橘纤维与 3 号柑橘纤维整体呈现出较为细小颗粒状。

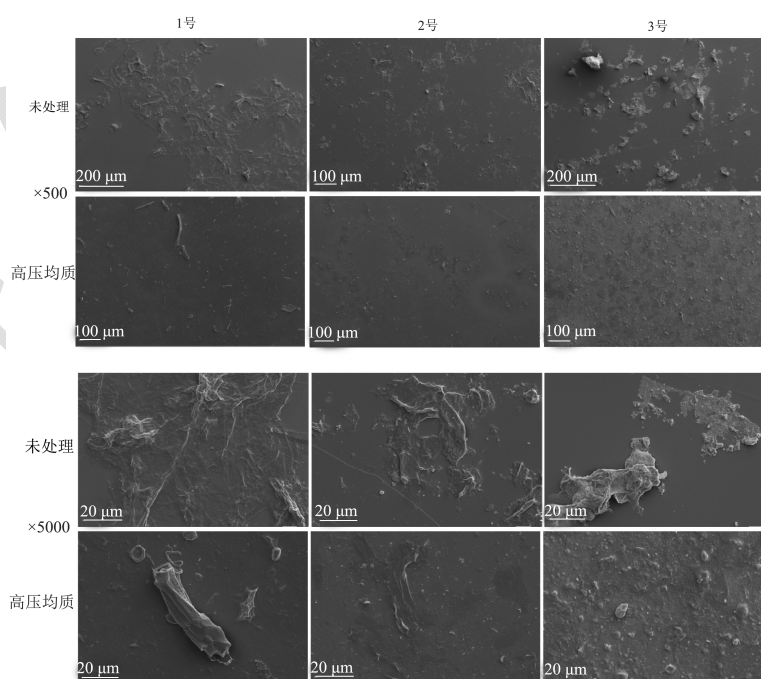


图8 高压均质对柑橘纤维悬浮液的表观形态的影响测定结果

Fig.8 Effect of high pressure homogenization on micro-structure of different citrus fiber suspension solution

3 结论

3.1 1号柑橘纤维不溶性纤维含量相对较高,持水性、持油性以及膨胀性均为最优;2号柑橘纤维果胶含量较高,悬浮液经高压均质以及超声波处理后粒径变化最小。经过30 MPa, 60 °C高压均质处理两遍后,三种柑橘纤维的粒径减小,但悬浮液稳定性和黏度均有提升。超声波处理后,三种柑橘纤维悬浮液粒径整体呈现出减小的趋势、黏度随超声处理时间的增加而提高;Zeta 电位绝对值在0~5 min的处理过程中呈现出上升的趋势,5~20 min呈现缓慢下降的趋势,说明一定时间后,超声波处理对三种柑橘纤维悬浮液结构稳定性影响较小。

3.2 柑橘纤维经过高压均质和超声波处理后,其物化性能以及表观结构均有明显改善,为拓宽柑橘纤维的应用提供理论基础;三种不同柑橘纤维表现出不同的物化性质,与其微观的纤维网孔结构相关。

参考文献

- [1] 向琴.小麦膳食纤维构效关系研究及化学成分选择性重组[D].华南理工大学,2015
- XIANG Qin. Study on structure-activity relationship of wheat dietary fiber and selective recombination of chemical components [D]. South China University of Technology, 2015
- [2] 丁晓波,张华,刘世尧,等.柑橘果品营养学研究现状[J].园艺学报,2012,39(9):1687-1702
- DING Xiao-bo, ZHANG Hua, LIU Shi-jun, et al. Current research status of citrus fruit nutrition [J]. Chinese Horticulture Sinica, 2012, 39(9): 1687-1702
- [3] Brownlee I A. The physiological roles of dietary fiber [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(2): 238-250
- [4] Crizel T D M, Jablonski A, Rios A D O, et al. Dietary fiber from orange byproducts as a potential fat replacer [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 53(1): 9-14
- [5] Mudgil D, Barak S. Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 61(10): 1-6
- [6] Lundberg B. Using highly expanded *Citrus* fiber to improve the quality and nutritional properties of foods [J]. Cereal Foods World, 2005, 50(5): 248-252
- [7] Zahra N, Sara M, Hossein A C. Effect of *Citrus* fiber replacement to oil and egg on some physico-chemical and organoleptic properties of muffin [J]. Iranian Food Science and Technology Research Journal, 2017, 62(6): 458-468
- [8] 王亭凯.AQ-Plus(R)柑橘纤维:纯天然,无添加的解决方案[C]//中国乳制品工业协会第十八次年会.2012
- WANG Ting-kai. AQ-Plus(R) Citrus Fiber: A natural, additive-free solution [C] // The 18th Annual Meeting of the China Dairy Industry Association. 2012
- [9] 何李,李绍振,高彦祥,等.柑橘属果皮渣制备膳食纤维的研究进展[J].食品科学,2012,33(7):310-314
- HE Li, LI Shao-zhen, GAO Yan-xiang, et al. Research progress on preparation of dietary fiber from citrus pericarp residues [J]. Food Science, 2012, 33(7): 310-314
- [10] 李焕霞,任志,王华,等.我国膳食纤维研究现状分析[J].中国食品添加剂,2007,2:61-164
- LI Huan-xia, REN Zhi, WANG Hua, et al. Analysis of dietary fiber research in China [J]. China Food Additives, 2007, 2: 61-164
- [11] Bingham S. Definitions and intakes of dietary fiber [J]. American Journal of Clinical Nutrition, 1987, 45(5 Suppl): 1226-31
- [12] Marin F R, Solerriivas C, Benaventegarcia O, et al. By-products from different *Citrus* processes as a source of customized functional fibres [J]. Food Chemistry, 2007, 99(2): 736-741
- [13] Lundberg B, Pan X, White A, et al. Rheology and composition of *Citrus* fiber [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 125(1): 97-104
- [14] Sudha M L, Baskaran V, Leelavathi K. Apple pomace as a source of dietary fiber and polyphenols and its effect on the rheological characteristics and cake making [J]. Food Chemistry, 2007, 104(2): 686-692
- [15] Gorinstein S, Martín-Belloso O, Park Y S, et al. Comparison of some biochemical characteristics of different *Citrus* fruits [J]. Food Chemistry, 2001, 74(3): 309-315
- [16] Costa G E D A, Queiroz-Monici K D S, Reis S M P M, et al. Chemical composition, dietary fiber and resistant starch contents of raw and cooked pea, common bean, chickpea and lentil legumes [J]. Food Chemistry, 2006, 94(3): 327-330
- [17] Fernández-López J, Fernández-Ginés J M, Aleson-Carbonell L, et al. Application of functional citrus by-products to meat products [J]. Trends in Food Science & Technology, 2004, 15(3-4): 176-185
- [18] 陶兵兵,赵国华.超微粉碎对柑橘皮渣中非水溶性膳食纤维的理化性质和抗氧化活性的影响[C]//2013 全球华人保健.2013
- TAO Bingbing, ZHAO Guohua. Effects of ultrafine

- pulverization on physicochemical properties and antioxidant activities of water-insoluble dietary fiber in citrus peel [C] // 2013 Global Chinese Health. 2013
- [19] Talens C, Álvarez-Sabatel S, Rios Y, et al. Effect of a new microwave-dried orange fiber ingredient vs. a commercial *Citrus* fiber on texture and sensory properties of gluten-free muffins [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017
- [20] 潘明,王世宽.锦橙皮渣膳食纤维提取研究[J].四川理工学院学报(自然科学版),1999,12(4):54-58
PAN Ming, WANG Shi-kuan. Study on extraction of dietary fiber from Jinchengpi residue [J]. Journal of Sichuan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 1999, 12(4): 54-58
- [21] 池宁琳.植物纤维中不溶性碳水化合物的测定[D].上海:复旦大学,2012
CHI Ning-lin. Determination of insoluble carbohydrates in plant fibers [D]. Shanghai: Fudan University, 2012
- [22] 范静,陈伏生,周怀林,等.中亚热带次生混交林不同功能群植物叶片可提取态碳水化合物的组成及动态[C]//中国植物学会会员代表大会暨八十周年学术年会.2013
FAN Jing, CHEN Fu-sheng, ZHOU Huai-lin, et al. Composition and dynamics of extractable carbohydrates from leaves of different functional groups of secondary mixed forests in mid-subtropical regions [C] // Chinese Botanical Society Congress and 80th Anniversary Annual Conference. 2013
- [23] Gu Y, Xiao H, et al. Method for improving sugar utilization rate of *Clostridium acetobutylicum* in mixed sugar fermentation: WO 2012159571 A1[P]. 2012
- [24] 黄泽元,李永明.谷物不溶性膳食纤维测定方法改进研究[J].粮食与饲料工业,1999,7:47-48
HUANG Ze-yuan, LI Yong-ming. Research on the improvement of methods for the determination of insoluble dietary fibers in cereals [J]. Cereals and Meals, 1999, 7: 47-48
- [25] 张先,闫妍,李范洙.苹果梨果渣膳食纤维的物理特性[J].食品科学,2009,30(3):113-116
ZHANG Xian, YAN Yan, LI Fan-zhu. Physical characteristics of dietary fiber from apple pear marg [J]. Food Science, 2009, 30(3): 113-116
- [26] 王大为,郭雪飞,杨羿.高温高压挤出处理对玉米皮膳食纤维溶解特性及物性的影响[J].食品科学,2011,32(13):84-88
WANG Da-wei, GUO Xue-fei, YANG Yi. Effects of high temperature and high pressure extrusion treatment on the dissolution and properties of dietary fiber in maize skin [J]. Food Science, 2011, 32(13): 84-88
- [27] Pla M F D E, González P, Sette P, et al. Effect of processing on physico-chemical characteristics of dietary fiber concentrates obtained from peach (*Prunus persica* L.) peel and pulp [J]. Food Research International, 2012, 49(1): 184-192
- [28] Willemsen K L D D, Panozzo A, Moelants K, et al. Physico-chemical and viscoelastic properties of high pressure homogenized lemon peel fiber fraction suspensions obtained after sequential pectin extraction [J]. Food Hydrocolloids, 2017
- [29] Zhang N, Ai-Jun L I, Tan Y L, et al. *In vitro* study on dietary fiber particles after fermented with human fecal flora [J]. Food Science, 2007
- [30] Wilmott J M, Ross M A. Surfactant-free, submicron hydrophobic dispersions and food enhancement therewith: US, US 20140272071 A1 [P]. 2014
- [31] Liu C M, Lan H J, Zong-Cai T U, et al. Effects of composite emulsifying stabilizers on glomeration of dietary fiber with instantaneous high pressure (IHP) [J]. Food Science, 2007
- [32] Lundberg B, Pan X, White A, et al. Rheology and composition of citrus fiber [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 125(1): 97-104
- [33] 刘倩茹,冯纪璐,翁静宜,等.基于大豆多糖的复合乳液储藏稳定性研究[J].现代食品科技,2016,3:91-97
LIU Qian-ru, FENG Ji-jun, WENG Jing-yi, et al. Study on storage stability of composite emulsion based on soybean polysaccharide [J]. Modern Food Science & Technology, 2016, 3: 91-97
- [34] Harholt JeSper, Suttangkakul Anongpat, Scheller Henrik Vibe. Biosynthesis of pectin [J]. Plant Physiology, 2010, 153(2): 384-395
- [35] French A D. Idealized powder diffraction patterns for cellulose polymorphs [J]. Cellulose, 2014, 21(2): 885-896
- [36] Zhao S, Xiong S, Qiu C, et al. Effect of microwaves on rice quality [J]. Journal of Stored Products Research, 2007, 43(4): 496-502
- [37] Lundberg B, Pan X, White A, et al. Rheology and composition of *Citrus* fiber [J]. Journal of Food Engineering, 2014, 125(1): 97-104
- [38] Yildiz E, Demirkesen I, Mert B. High pressure microfluidization of agro by-product to functionalized dietary fiber and evaluation as a novel bakery ingredient [J]. Journal of Food Quality, 2016, 39(6): 599-610

- [39] 唐爱民.超声波作用下纤维素纤维结构与性质的研究[D]. 广州:华南理工大学,2000
TANG Ai-min. Study on the structure and properties of cellulose fibers under ultrasound [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2000
- [40] Liu Y, Liu A, Ibrahim S A, et al. Isolation and characterization of microcrystalline cellulose from pomelo peel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111:717-721
- [41] 王晨,徐长鸣,孙世荣,等.杨木 APMP 纤维超声波处理效果 [J].纸和造纸,2013,32(5):16-18
WANG Chen, XU Chang-ming, SUN Shi-rong, et al. Effect of ultrasonic treatment of poplar APMP fibers [J]. Journal of Paper and Manufacture, 2013, 32(5): 16-18
- [42] 赵强,蒲俊文.超声波处理对植物纤维的影响研究进展[J]. 中华纸业,2008,29(15):62-67
ZHAO Qiang, PU Jun-wen. Research progress of effects of ultrasonic treatment on plant fibers [J]. China Paper Industry, 2008, 29(15): 62-67
- [43] 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, 2017,8:10-13
DING Sha-sha, HUANG Li-xin, ZHANG Cai-hong, et al. Effects of High-pressure homogeneous and colloidal Milling on the performance of olive-pomace water-insoluble dietary fibers [J]. Food and Machinery, 2017, 8: 10-13
- [44] Betoret E, Betoret N, Rocculi P, et al. Strategies to improve food functionality: Structure-property relationships on high pressures homogenization, vacuum impregnation and drying technologies [J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 46(1): 1-12
- [45] Augusto P E D, Ibarz A, Cristianini M. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the rheological properties of tomato juice: Time-dependent and steady-state shear [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(4): 570-579
- [46] Yu Z Y, Jiang S W, Cao X M, et al. Effect of high pressure homogenization (HPH) on the physical properties of taro (*Colocasia esculenta* (L). Schott) pulp [J]. Journal of Food Engineering, 2016, 177: 1-8