微射流技术对食品大分子物质性质及结构的影响

李 越[1,2]，刘春菊[*2]，李大婧[2]，郭 嘉[2]，庞文倩[1,2]，
赵 邯[1,2]，牛丽影[2]，吴海虹[2]，孙希云[1]，陈延训[3]
（1. 沈阳农业大学 食品学院，辽宁 沈阳 110161；2. 江苏省农业科学院 农产品加工研究所，江苏 南京 210014；3. 徐州久顺食品有限公司，江苏 徐州 221700）

摘要：利用动态高压微射流（dynamic high-pressure microfluidization，DHPM）对纤维多糖（AX）、蛋白质（WP）、淀粉（PS）和果胶（PE）进行均质处理，通过分析处理前后大分子物质的粒径、扫描电镜图、X射线衍射图、紫外吸收光谱、傅里叶红外光谱以及表观黏度，研究DHPM对大分子物质基本性质和结构的影响。结果发现：经DHPM处理后4种大分子物质粒径均减小，平均粒径分别减小了79%、31%、68%、63%，大分子颗粒表面在剪切力作用下受到了不同程度的剪切和破碎，AX和PS的表观黏度增加，WP和PE则减少；X射线衍射、紫外吸收光谱及傅里叶红外光谱结果显示均质前后的特征峰及官能团未发生改变，而吸收峰的强度有不同程度的变化，样品部分吸收峰发生红移，AX、PS、PE的O—H氢键缔合伸缩振动特征吸收峰峰宽增加，WP二级结构α-螺旋消失，β-折叠含量减少，结晶度下降。可以看出，DHPM处理使4种大分子物质的性质及结构产生一定的改变。该研究为食品大分子物质的深度开发与资源利用提供了理论依据。

关键词：动态高压微射流；大分子物质；物理改性；结构
中图分类号：TS 231　**文章编号：**1673-1689(2023)03-0083-11　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.03.010

Effect of Microfluidization Technology on Properties and Structure of Macromolecular Substances

LI Yue[1,2]，*LIU Chunju*[*2]，*LI Dajing*[2]，*GUO Jia*[2]，*PANG Wenqian*[1,2]，
ZHAO Han[1,2]，*NIU Liying*[2]，*WU Haihong*[2]，*SUN Xiyun*[1]，*CHEN Yanxun*[3]
(1. College of of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China; 2. Institute of Argo-Product Processing, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Xuzhou Jiushun Food Co.Ltd., Xuzhou 221700, China)

Abstract: Dynamic high-pressure microfluidization (DHPM) were applied to homogenize cellulose polysaccharide (AX), protein (WP), starch (PS) and pectin (PE). The effect of DHPM on the basic properties and structure of macromolecular substances before and after treatment was analyzed by the measurements of particle size, scanning electron microscope, X-ray diffraction (XRD), ultraviolet (UV) absorption spectrum, Fourier transform infrared (FT-IR) spectrum, and apparent viscosity. The results showed that the average particle sizes of four macromolecules after DHPM treatment decreased by 79%, 31%, 68%, and 63%, respectively. The surface of macromolecular particles was

收稿日期：2022-09-28
基金项目：江苏省农业科技自主创新基金项目（CX(22)3176）；江苏省苏北科技专项项目（XZ-SZ202102）；江苏现代农业产业技术体系建设专项基金项目（JATS[2021]446）。
*** 通信作者：**刘春菊（1979—），女，博士，副研究员，硕士研究生导师，主要从事果蔬加工与品质调控方面的研究。
E-mail：cjliu0306@163.com

sheared and broken to different degrees under the action of shear force. The apparent viscosity of AX and PS increased, while that of WP and PE decreased. The results of XRD, UV absorption and FT-IR spectra showed that there was no change in the characteristic peaks and functional groups before and after homogenization, however, the intensity of the absorption peak varies in different degrees and some absorption peaks were red-shifted. The peak width of stretching vibration characteristic absorption peak of O—H hydrogen bond in AX, PS and PE increased. The α-helix of WP secondary structure disappeared, and the β-sheet content and crystallinity decreased. DHPM treatment could change the properties and structure of the four macromolecules to some extent. This study could provide a theoretical basis for the in-depth development and resource utilization of food macromolecular substances.

Keywords: dynamic high-pressure microfluidization, macromolecular substances, physical modification, structure

果蔬细胞基质中含有多种大分子物质,主要包括纤维多糖、蛋白质、淀粉及果胶等,这些大分子物质被认为是食品的主要营养成分,对果蔬的生理特性和物化特性具有重要作用[1]。纤维多糖主要存在于果蔬的细胞壁中,对细胞壁结构的支撑具有重要意义,其理化性质也决定其生理作用[2]。蛋白质主要由碳、氢、氮、氧等化学元素组成,是食品的关键结构成分,其自身结构与功能性质密切相关[3-5]。淀粉是高分子碳水化合物,由葡萄糖分子聚合而成,其链状分支对维持细胞结构稳定有一定作用[4]。果胶是存在于植物细胞壁中的一种复杂多糖,对细胞壁结构具有一定支撑作用,果胶的多功能性源自其分子中存在极性与非极性的区域,使其可以添加到不同的食品体系中[6]。而果蔬中存在的大分子物质相对分子质量较大,在食品加工利用过程中具有一定的局限性。如天然淀粉具有耐热性低、溶解性低和黏稠性高等特点,这些特点使其应用率低,不能满足产业要求[7]。因此,近几年对大分子物质进行均质化成了广大学者研究的热点之一[8-9]。

动态高压微射流(dynamic high-pressure microfluidization,DHPM)技术是一种新兴的均质化技术,主要通过强烈剪切力、高频振动、高速冲击力和瞬间降压的组合力对样品进行均质处理,与传统均质技术相比可产生更大的能量,适用于流体材料的连续非热改性,具有高效、环保、可连续操作等优点[10-11]。Wang 等研究发现,经 DHPM 处理后桃汁的粒径显著降低,其稳定性及品质特性有所提高[12];Chau 等研究表明,经 DHPM 处理后,不溶性膳食纤维粒径显著降低,可有效增强其体外降血糖的潜力和降低胆固醇的活性[13];Sangnark 等研究表明,在面包中加入粒径小的纤维可有效降低其体积和柔软度,显著提高面包的品质特性[14]。可以看出,DHPM 技术可实现对大分子物质的超微粉碎,使粒径达到微米级水平,进而改善产品的功能特性及品质特性[15-16]。经 DHPM 加工处理后大分子物质的功能特性与其性质及结构密切相关,不同的大分子物质之间性质及结构也存在一定的差异[17]。因此,研究 DHPM 处理对不同食品大分子物质性质和结构变化的影响及其之间的差异是非常有必要的。

作者以 DHPM 处理前后的 4 种食品大分子物质为研究对象,通过对其粒径、紫外吸收光谱、表观黏度、傅里叶红外光谱、X 射线衍射图、微观形貌的研究,分析 DHPM 对 AX、WP、PS 和 PE 的基本性质及结构的影响,切实提高食品大分子物质的综合利用价值,为食品大分子物质的深度开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

阿拉伯木聚糖(纯度 95%):陕西帕尼尔生物科技有限公司产品;乳清蛋白(食品级,纯度 80%):南京杰百科生物科技有限公司产品;预胶化淀粉(食品级,纯度 99%):曲阜市天利药用辅料有限公司产品;苹果果胶(食品级,纯度 99%):南京德居生物科技有限公司产品。

1.2 仪器与设备

LM20 微射流纳米均质机:加拿大 Microfluidics 公司产品;NICOMP Z3000 纳米粒度电位仪:美国 PSS 粒度仪公司产品;EVO-LS10 扫描电子显微镜:德国卡尔·蔡司股份公司产品;D2 PHASER X 射线衍射仪:德国布鲁克 AXS 有限公司产品;UV-6300

紫外分光光度计:上海美谱达仪器有限公司产品;Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪:美国 Thermo Fisher Scientific 有限公司产品;Discovery HR10 混合流变仪:美国 TA 仪器公司产品。

1.3 方法

1.3.1 原料预处理 分别称取 5 g 阿拉伯木聚糖、乳清蛋白、预胶化淀粉、果胶,用蒸馏水配制质量分数为 5%的阿拉伯木聚糖溶液、乳清蛋白溶液、预胶化淀粉溶液和果胶溶液,得到原溶液;用 LM20 微射流纳米均质机在 80 MPa 下对原溶液进行微射流均质,循环 3 次,得到处理组溶液;将原溶液分别标记为 ORI-AX、ORI-WP、ORI-PS、ORI-PE,处理组溶液分别标记为 EXP-AX、EXP-WP、EXP-PS、EXP-PE。

1.3.2 粒径测定 采用 NICOMP Z3000 纳米粒度电位仪对微射流均质前后的溶液立即进行粒径测定,得到其粒径分布图。测定溶液需适当稀释 5~10 倍,分散剂为蒸馏水。

1.3.3 颗粒形貌观察 采用 EVO-LS10 扫描电子显微镜(SEM)观测溶液颗粒微观形貌结构。将少量样品粉末粘在样品座的胶带上,在仪器内进行真空镀膜以及喷镀电导层,在 10 kV 电压下放大 500 倍和 1 000 倍进行观察。

1.3.4 X 射线衍射分析 干燥后得到的粉末采用 D2 PHASER X 射线衍射仪在 2θ 为 5°~40°时进行衍射分析。对结晶度的计算参考满建民等的方法[18]。计算公式如下:

$$A=\frac{A_c}{A_a+A_c}\times 100\%$$

式中:A_c 表示结晶区面积;A_a 表示无定形区面积;A 表示结晶度,%。

1.3.5 紫外吸收光谱测定 将溶液适当稀释,采用 UV-6300 紫外分光光度计对均质前后的溶液进行紫外吸收光谱测定。在室温下以 100 nm/min 的速度从 190 nm 扫描到 500 nm。

1.3.6 傅里叶红外光谱测定 将微射流均质后的溶液进行 24 h 冷冻干燥,得到粉末。采用 Nicolet iS50 傅里叶变换红外光谱仪对粉末进行红外光谱扫描,每次扫描都用空气光谱进行背景矫正,扫描范围为 500~4 000 cm^{-1}。用 Omnic 8.0 和 PeakFit 4.12 软件对实验数据进行分析。

1.3.7 表观黏度测定 参考 Diao 等的方法并加以修改[19]。采用 Discovery HR10 型混合流变仪对均质前后溶液的表观黏度进行测定。实验在 25 ℃条件下进行,选择探头直径 60 mm 的椎板,板间距为 0.5 mm,角速度为 0~200 rad/s,记录各剪切速率下的黏度绘制相应的黏度曲线。

1.4 数据处理

所有实验均重复 3 次,实验数据由 SPSS 23.0 软件进行方差分析,并用 Origin 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 DHPM 对大分子物质粒径的影响

DHPM 均质前后大分子物质的粒径分布变化以及平均粒径变化分别见图 1 和图 2。粒径分布宽度可表示物料粒径的均匀程度,粒径分布越宽,表明物料颗粒的粗细越不均匀[20]。大分子物质粒径的大小是影响其理化性质的关键因素[21]。EXP 组样品的粒径分布宽度和平均粒径均低于 ORI 组样品。ORI-AX 溶液的粒径分布大部分集中在 0~50 μm,EXP-AX 溶液粒径集中分布在 0~18 μm,平均粒径由 22.82 μm 减小至 4.79 μm,减小了 79%;ORI-WP 溶液的粒径主要分布在 0.05~0.07 μm,而 EXP-WP 的粒径分布在 0.01~0.08 μm,平均粒径由 0.068 μm 减小至 0.047 μm,减小了 31%;ORI-PS 溶液的粒径分布在 0~10 μm,EXP-PS 的粒径分布在 0~2 μm,平均粒径由 1.89 μm 减小至 0.61 μm,减小了 68%;ORI-PE 溶液的粒径大都分布在 0~1 μm,而 EXP-PE 溶液粒径集中在 0~0.2 μm,并且平均粒径由 0.18 μm 减小至 0.07 μm,减小了 63%。溶液在 DHPM 均质机中由于巨大的压力差推动,大分子颗粒间的碰撞以及大分子颗粒与管道之间的碰撞都使物料大分子被剪切和破碎,从而使大分子物料的粒径显著减小[22]。有研究表明 DHPM 处理后,膳食纤维颗粒经过强烈剪切、高速冲击和高频振动等作用,使物料局部凝集状态被分散和细化,分子侧链断裂,颗粒较为均匀且粒径减小[23]。EXP-WP 粒径的减小可能是由于 DHPM 的强烈剪切作用,使紧密的有序结构受到破坏,形成更小的粒子[24-25]。DHPM 处理导致 ORI-PS 结晶区的分子排列改变,颗粒结构变疏松,削弱了颗粒之间的范德华力和静电引力,其粒径减小[26-27]。EXP-PE 粒径的减小可能是由于 DHPM 的机械力使 ORI-PE 分子打开,引起分子内糖苷键的断裂,进而使一部分 ORI-PE 发生降解[28]。

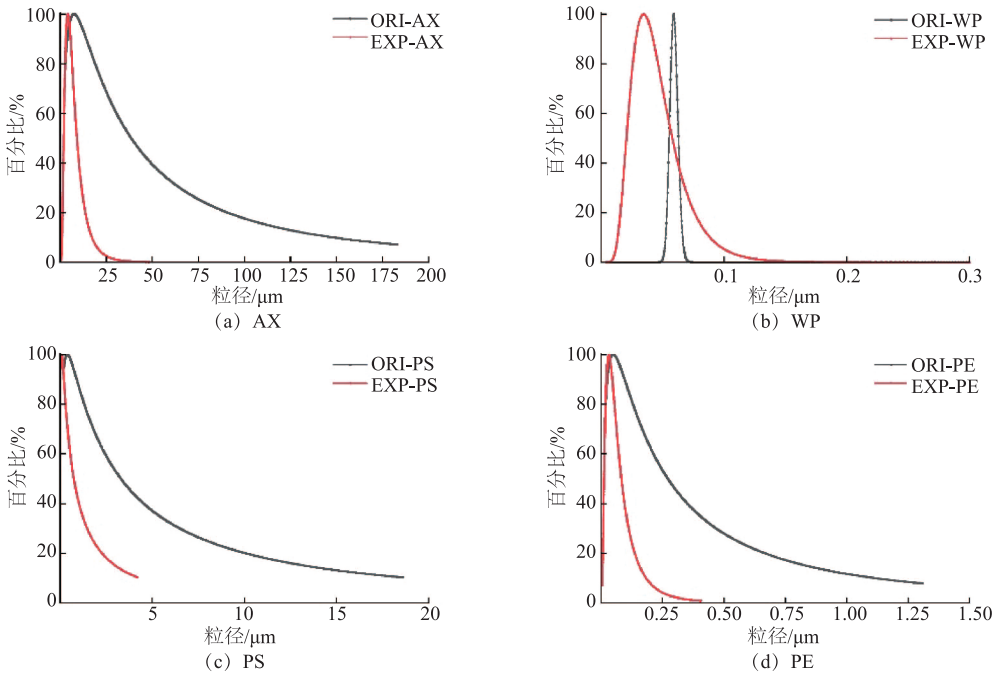
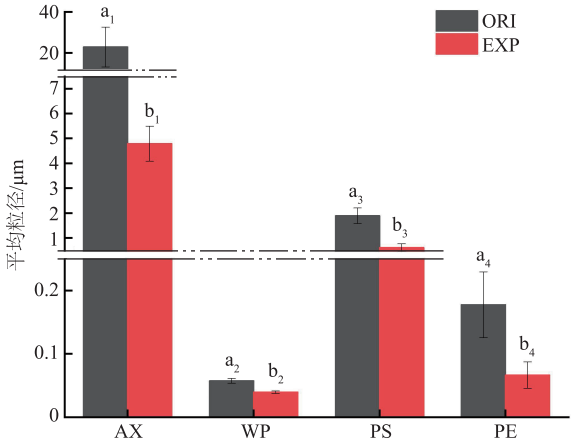


图 1　DHPM 对大分子物质粒径分布的影响

Fig. 1　Effect of DHPM on the particle size distribution of macromolecular substances



同一大分子物质对应的不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 2　DHPM 对大分子物质平均粒径的影响

Fig. 2　Effect of DHPM on the average particle size of macromolecular substances

2.2　DHPM 对大分子物质微观形貌的影响

DHPM 对大分子物质微观形貌的影响见图 3。大分子物质经过 DHPM 均质处理后,颗粒形貌具有较为明显的变化。ORI-AX 颗粒呈现工整的纤维形晶体状,表面光滑,颗粒较大,而 EXP-AX 则表现为不规则的块状结构,表面较为粗糙,颗粒发生断裂和破碎,这可能是因为 DHPM 强烈的剪切作用使颗粒组织松散[4]。ORI-WP 表面平整光滑,表现为平板状结构,而在 EXP-WP 的微观图像中可以看到明显的断层以及破碎的边缘;这是由于 DHPM 会破坏 ORI-WP 分子内部的疏水相互作用,使内部更多的疏水性区域暴露,分子受到破坏[29]。ORI-PS 颗粒呈现圆润光滑的球形,EXP-PS 颗粒表面出现皱缩现象,颗粒发生破损,这可能是 EXP-PS 在均质过程中由于高压产生的高温使颗粒糊化,内部结构崩塌所导致,表明 DHPM 可显著破坏颗粒形态[30]。ORI-PE 结构特征表现为薄层结构,EXP-PE 经过均质后结构被破坏,出现蛛丝状结构,可能原因是物料经 DHPM 处理后发生了降解现象,表面结构呈现多孔状态,果胶链受到较强的机械力,使结构变为丝状[31-32]。

2.3　DHPM 对大分子物质 X 射线衍射的影响

DHPM 处理大分子物质的 X 射线衍射如图 4 所示。均质后大分子物质的衍射图谱特征峰与均质前基本一致,而在衍射强度方面发生不同的变化。DHPM 对大分子物质的结晶度影响见表 1。

ORI-AX 的 X 射线衍射图显示较多的峰,主衍射峰在 22°处,表明 ORI-AX 呈典型的纤维素和半纤维素晶体结构,物料经 DHPM 处理后可以看出,EXP-AX 与 ORI-AX 的衍射峰位置基本一致,说明 DHPM 处理不会改变 ORI-AX 的晶体结构,这与汤彩碟等的研究结果一致[4]。而由表 1 可知,ORI-AX

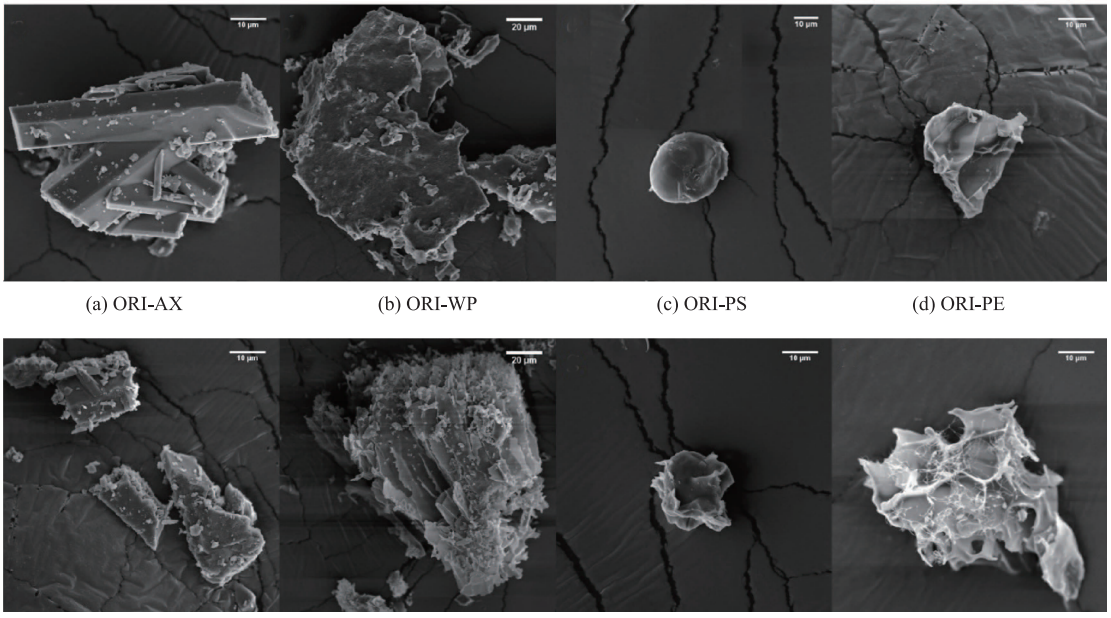


图 3 DHPM 对大分子物质微观形貌的影响

Fig. 3 Effect of DHPM on the microscopic morphology of macromolecular particles

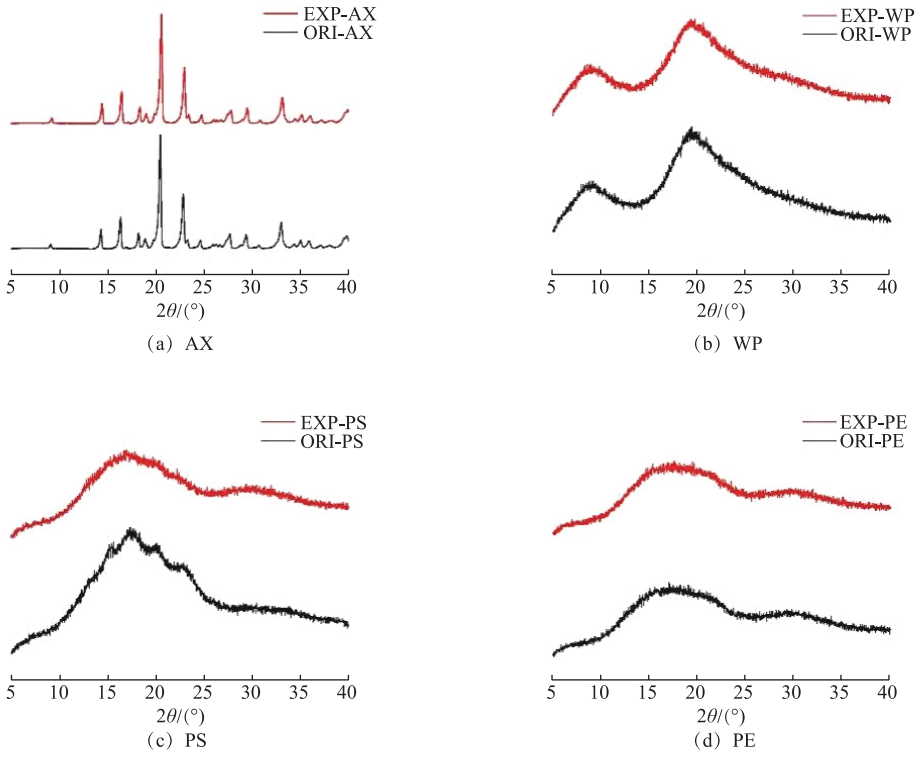


图 4 DHPM 处理大分子物质的 X 射线衍射图

Fig. 4 X-ray diffraction patterns of DHPM-processed macromolecular substances

与 EXP-AX 的结晶度无显著变化(P>0.05),这与汤彩碟等研究结果较为不同[4]。他们提出,DHPM 使纤维素类样品的结晶度下降,其剪切作用可导致纤维素分子间的氢键发生断裂,部分结构致密的结晶区向无序的非结晶区转化,这可能与 DHPM 的压力有关。ORI-WP 的 X 射线衍射图在 2θ 为 9.3°和 19.5°左右出现的宽衍峰分别对应二级结构的 α-螺旋和 β-折叠[33],图中可见 EXP-WP 的第一个吸收峰发生

表 1　DHPM 对大分子物质结晶度的影响

Table 1　Effect of DHPM on the crystallinity of macromolecular particles

组别	结晶度/%			
	AX	WP	PS	PE
ORI	94.97±0.55[a]	53.44±2.07[a]	51.81±2.19[a]	47.38±1.10[a]
EXP	94.49±1.14[a]	49.00±1.46[b]	44.42±1.34[b]	40.19±0.84[b]

注：同一列不同上标字母表示差异显著(P<0.05)。

略微右移，由表 1 可知 EXP-WP 结晶度降低。ORI-PS 的 X 射线衍射图显示在 2θ 为 15°、17°、19°、22° 处出现 4 个峰，表现为典型的 A 型晶体结构，而 EXP-PS 的衍射曲线呈现拱形峰，由表 1 可知，EXP-PS 较 ORI-PS 的结晶度显著下降，这表明 ORI-PS 样品经过 DHPM 机械力作用，结晶区内连接微晶的较弱氢键被破坏，结晶区的有序性程度降低，双折射现象逐渐消失，产生糊化现象，由此可见，DHPM 能有效破坏 ORI-PS 内部结晶结构[26,34]。ORI-PE 的 X 射线衍射结果显示其结晶度较低，整体属于非晶体结构，EXP-PE 的结晶度降低，即分子的有序结构减少，使分子内部更多的活性基团暴露出来，使其更容易发挥生物活性，更有利于体现抗氧化活性和抗肿瘤活性等，提高其利用价值[35]。

2.4　DHPM 对大分子物质紫外吸收的影响

DHPM 处理大分子物质的紫外吸收光谱如图 5 所示。从图中可以看到 EXP 组与 ORI 组相比，吸收光谱曲线趋势基本一致，但紫外吸收出现不同程度的增强，并伴随着轻微红移。ORI-AX 与 EXP-AX 相比，紫外吸收的最大吸光度由 3.87 增强到 4.31，最大吸收波长由 235 nm 移至 238 nm，这可能是由于 DHPM 处理使分子中功能基团的裸露度增加，导致其紫外吸收增强[36]。EXP-WP 在 350~500 nm 的紫外吸收发生约 20 nm 的红移，可能是由于 DHPM 处理使乳清蛋白中 Trp 和 Tyr 残基侧链的疏水基团暴露导致的，使其有机化合物的结构发生变化[37-38]。

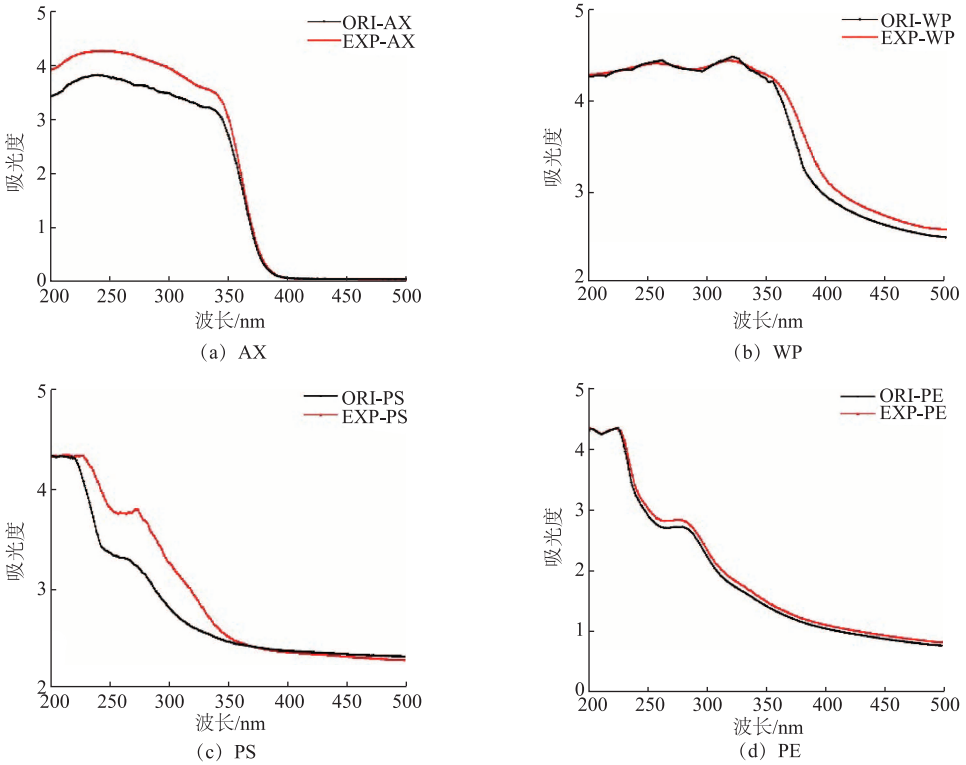


图 5　DHPM 处理大分子物质的紫外吸收光谱图

Fig. 5　UV absorption spectra of DPHM-treated macromolecular substances

EXP-PS 较 ORI-PS 差异较大,在 222~367 nm 的紫外吸收发生明显增强,275 nm 处的紫外吸收变化最大,由 3.21 增至 3.78,可能是因为 DHPM 处理时部分 ORI-PS 发生糊化(同 2.3 结果),溶液的吸光度增大[39]。EXP-PE 的紫外吸收在228~500 nm 发生微弱增强,278 nm 处增幅最大,由 2.73 增大至 2.85,这可能与 DHPM 处理过程中 PE 的酯化度修饰和水解有关[31]。

2.5 DHPM 对大分子物质傅里叶红外光谱的影响

DHPM 处理大分子物质的傅里叶红外光谱如图 6 所示。DHPM 处理后 4 种大分子物质的整体峰型和位置与 DHPM 处理前相比出现较大差异,这表明 DHPM 处理后 4 种大分子物质的官能团未发生变化,但部分吸收峰的强度存在细微变化。

从图 6(a)、图 6(c)、图 6(d)均可以观察到糖类 3 个特征吸收峰,包括在 3 400 cm^{-1} 处的 O—H 氢键缔合伸缩振动特征吸收峰,2 933 cm^{-1} 处出现的 C—H 伸缩振动峰和 1 417~1 241 cm^{-1} 附近的 C—H 弯曲振动峰[40],经 DHPM 处理后此峰略有减弱,这可能是处理过程中 DHPM 的剪切力和空穴作用力显著增强,使样品分子产生剧烈破碎[41]。且由表 2 可知,DHPM 处理后 3 种大分子多糖在 3 400 cm^{-1} 处的吸收峰峰宽均增加,说明 DHPM 使多糖分子的缔合氢键发生断裂(与 2.2、2.3 结果一致),游离羟基数量增加[42]。1 003、1 077、1 148 cm^{-1} 处的吸收峰属于—CHO 伸缩振动吸收峰[43];1 645 cm^{-1} 处的吸收峰为分子内氢键的吸收峰[44];1 085 cm^{-1} 和 1 162 cm^{-1} 处分别是 PS 分子中伯羟基和仲羟基的特征吸收峰[45],ORI-PS 在 1 085 cm^{-1} 和 1 162 cm^{-1} 处的吸收峰强度分别是 73.85 和 87.24,EXP-PS 在 1 085 cm^{-1} 和 1 162 cm^{-1} 处的吸收峰强度分别是 75.61 和 87.66,ORI-PS 与 EXP-PS 在这两处的相对吸收强度分别为 0.85 和 0.86,相对吸收强度的增加表明 DHPM 均质处理使更多的伯羟基游离出来,游离出来的伯羟基将有助于提高 ORI-PS 反应活性[46]。

表 2 DHPM 对大分子多糖在 3 400 cm^{-1} 处红外光谱吸收峰峰宽的影响

Table 2 Effect of DHPM on the FT-IR absorption peak width of macromolecular polysaccharides at 3 400 cm^{-1}

组别	峰宽		
	AX	PS	PE
ORI	559.737	519.722	719.318
EXP	563.595	533.039	776.208

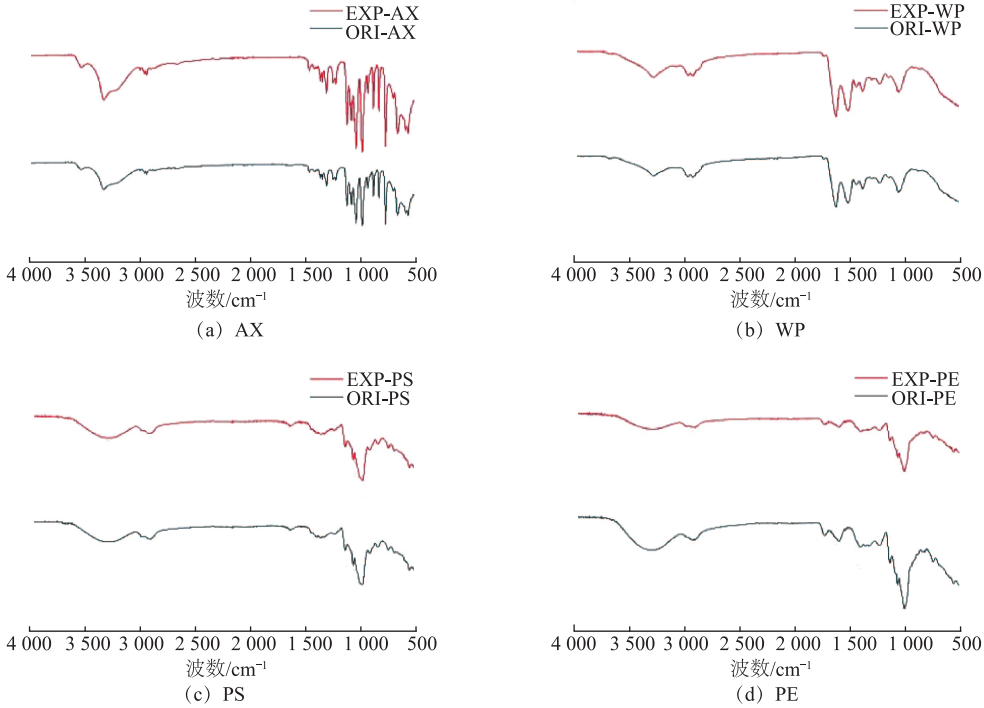
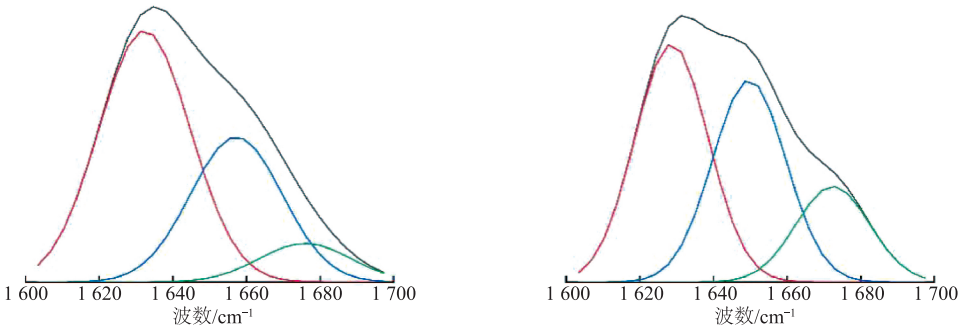


图 6 DHPM 处理大分子物质的傅里叶红外光谱图

Fig. 6 FT-IR spectra of DPHM-treated macromolecular substances

在图 6(b)中可以观察到 ORI-WP 在 3 277 cm^{-1} 处的特征吸收峰为酰胺 A 中的 N—H 伸缩振动，EXP-WP 红移至 3 281 cm^{-1} 处。WP 的酰胺 I 带分析结果如图 7 和表 3 所示。EXP-WP 二级结构中 α-螺旋消失，β-折叠含量减少，β-转角含量增加，出现了无规则卷曲结构。WP 的 α-螺旋结构的稳定主要由氢键维持，可能是 DHPM 处理时高压剪切使氢键断裂，使部分 α-螺旋转变为无规则卷曲结构。另外，1 630 cm^{-1} 和 1 523 cm^{-1} 处的吸收峰分别为酰胺 I 带和酰胺 II 带中 C=O 的伸缩振动峰[47]。



(a) ORI-WP　(b) EXP-WP

图 7　WP 在酰胺 I 带的傅里叶红外光谱图

Fig. 7　FT-IR spectra of Amide I bands of WP

表 3　酰胺 I 带分析结果

Table 3　Analysis results of Amide I band

组别	峰位置/cm^{-1}	峰面积/%	谱峰代表的二级结构	二级结构所占比例/%
ORI-WP	1 632	3.43	β-折叠	57.79
	1 657	1.98	α-螺旋	33.32
	1 675	0.53	β-转角	8.89
EXP-WP	1 628	3.59	β-折叠	44.44
	1 649	3.05	无规则卷曲	37.68
	1 672	1.45	β-转角	17.88

2.6　DHPM 对大分子物质溶液表观黏度的影响

DHPM 处理前后大分子物质溶液的表观黏度变化如图 8 所示。由图 8 可知，大分子物质溶液均表现出剪切稀化现象，即表观黏度均随着角速度的增大而减小，这是假塑性流体特有的性质。各溶液在低剪切速率下表观黏度下降较快，但当剪切应力持续增大时，表观黏度趋于平缓。而高剪切力会造成无序或有序的构象转变以及分子链的断裂，最终使溶液黏度有所减小[48]。

由图 8(a)和图 8(c)可知，EXP-AX 与 EXP-PS 较 ORI-AX 与 ORI-PS 样品表观黏度均增大，这可能是因为 DHPM 使其样品粒径分别减小了 79%和 68%，样品的凝集状态被分散，致使总表面积增加，相邻分子间交互作用增强，还可能是高压均质打破了部分大分子团，使体系中的可溶性成分增加，进而导致黏度增加[49]，这与刘成梅等对大豆膳食纤维的研究结果一致[50]。其中随着角速度的增大，ORI-AX 与 EXP-AX 的差别趋于零(见图 8(a))；而EXP-PS 的表观黏度变化则更为明显(见图 8(c))，这是由于 DHPM 处理过程中的强剪切力、高速冲击和高频振动对 ORI-PS 颗粒具有破坏作用，样品结晶度下降，颗粒结构变疏松，颗粒更易产生糊化现象，从而提高了溶液的黏度[22]。

与 EXP-AX 和 EXP-PS 相反，EXP-WP 与 EXP-PE 较 ORI-WP 与 ORI-PE 的样品表观黏度均减小，其中 ORI-WP 与 EXP-WP 在角速度较小时表观黏度差别较小，而随着角速度的增大，EXP-WP 的表观黏度较 ORI-WP 减小幅度变大(见图 8(b))，这可能是由于 DHPM 处理使蛋白质分子内部紧密的结晶区向非结晶区转化，疏水性区域暴露，二硫键断裂转化为分子间的二硫键，使蛋白质微粒的空间结构更稳定，钝化了微粒，降低了微粒之间的相

互作用[51]；EXP–PE 表观黏度降低，随着角速度的增大，表观黏度的降低幅度逐渐放缓（见图 8(d)）。原因可能是 DHPM 的机械力使分子内糖苷键断裂，使一部分 ORI–PE 发生降解，颗粒表面呈现多孔形态，从而导致溶液黏度减小[28]。

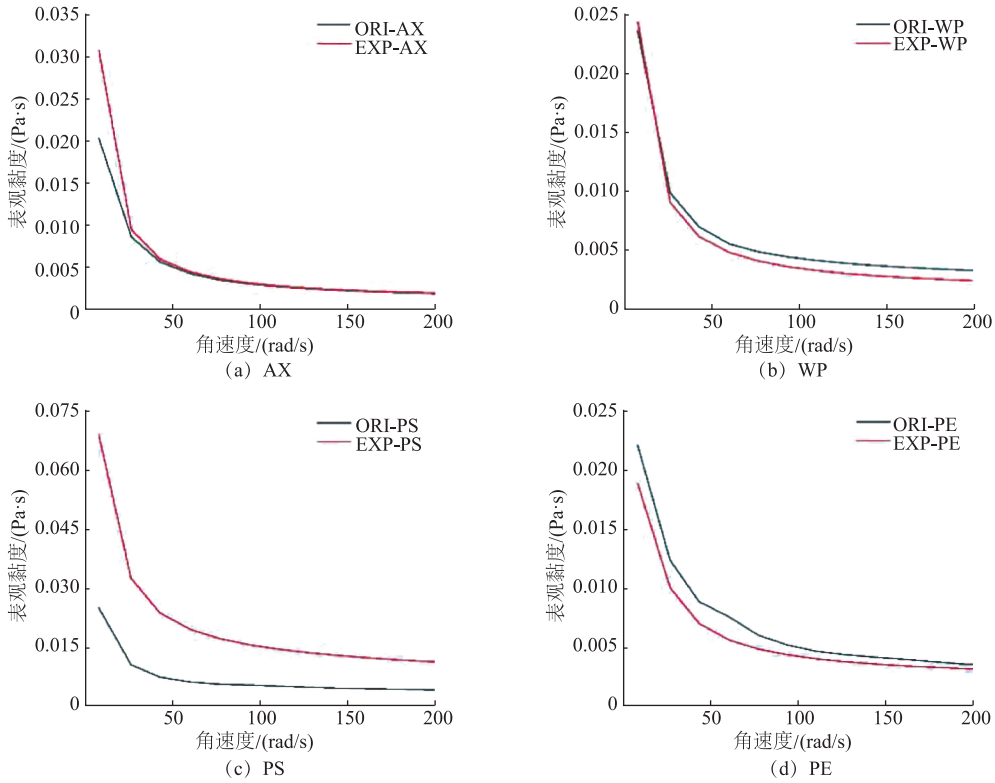


图 8　DHPM 对大分子物质表观黏度的影响

Fig. 8　Effect of DHPM on the apparent viscosity of macromolecular substances

3 结　语

作者研究了动态高压微射流处理对 4 种大分子物质性质及结构特性的影响。结果表明，EXP–AX 颗粒发生断裂及破碎，样品平均粒径较 ORI–AX 减少了 79%，紫外吸收强度增加，但晶体结构未发生改变，也无新的基团出现，表观黏度增大；EXP–WP 颗粒出现明显断层现象，样品平均粒径较 ORI–WP 减少了 31%，氢键断裂，其有机化合物结构发生改变，结晶度显著降低（P<0.05），二级结构中 α–螺旋向无规则卷曲转变，β–折叠含量减少，β–转角含量增加，表观黏度降低；EXP–PS 颗粒发生糊化，表面呈现破损与皱缩现象，样品平均粒径较 ORI–PS 减少了 68%，氢键被破坏，结晶度显著降低（P<0.05），更多的伯羟基被游离出来，黏度增加；EXP–PE 颗粒呈现蛛丝状，样品平均粒径较 ORI–PE 减少了 63%，氢键断裂，有序结构减少，紫外吸收强度增加，表观黏度降低。可见，DHPM 处理可有效改善 4 种食品大分子物质的性质及结构特性，其利用范围得到拓展，但目前 DHPM 对大分子物质的改性大多还停留在实验室研究阶段，其工业化应用还需更深入的研究。

参考文献：

[1] LOVEDAY S. Food proteins: technological, nutritional, and sustainability attributes of traditional and emerging proteins[J]. **Annual Review of Food Science and Technology**, 2019, 10(1): 311-339.

[2] 王艳峰，杨锡洪，曹峻菡，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.

[3] 黄欢，王绍帆，韩育梅. 超高压处理对鲜切马铃薯质地及细胞壁多糖含量的影响[J]. 食品工业科技，2020，41(2)：258-266.

[4] 汤彩碟,张甫生,杨金来,等. 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[J]. 食品与机械,2021,37(6):24-29.
[5] 刘培玲,张甫生,白云飞,等. 高静压对淀粉结构及糊化性质的影响[J]. 高压物理学报,2010,24(6):472-480.
[6] 陈军. 特色资源果胶的提取和物理化学性质表征及微射流降解机理[D]. 南昌:南昌大学,2013.
[7] DUAN D,TU Z,WANG H,et al. Physicochemical and rheological properties of modified rice amylose by dynamic high-pressure microfluidization[J]. **International Journal of Food Properties**,2017,20(4):734-744.
[8] TRUONG T,DAHAL D,URRUTIA P,et al. Crystallisation and glass transition behaviour of chilean raisins in relation to their sugar compositions[J]. **Food Chemistry**,2020,311:1-9.
[9] CHEN L,DAI Y,HOU H,et al. Effect of high pressure microfluidization on the morphology,structure and rheology of sweet potato starch[J]. **Food Hydrocolloids**,2021,115:1-7.
[10] ZHENG J,WANG N,HUANG S,et al. *In vitro* digestion and structural properties of rice starch modified by high methoxyl pectin and dynamic high-pressure microfluidization[J]. **Carbohydrate Polymers**,2021,274:1-9.
[11] ZHAO Q,YAN W,LIU Y,et al. Modulation of the structural and functional properties of perilla protein isolate from oilseed residues by dynamic high-pressure microfluidization[J]. **Food Chemistry**,2021,365:1-10.
[12] WANG X,WANG S,WANG W,et al. Comparison of the effects of dynamic high-pressure microfluidization and conventional homogenization on the quality of peach juice[J]. **Journal of the Science of Food and Agriculture**,2019,99(13):5994-6000.
[13] CHAU C F,WANG Y T,WEN Y L. Different micronization methods significantly improve the functionality of carrot insoluble fibre[J]. **Food Chemistry**,2007,100(4):1402-1408.
[14] SANGNARK A,NOOMHORM A. Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse[J]. **Food Chemistry**,2003,80(2):221-229.
[15] ABLIZ A,LIU J,MAO L,et al. Effect of dynamic high pressure microfluidization treatment on physical stability,microstructure and carotenoids release of sea buckthorn juice[J]. **Food Science and Technology**,2021,135:1-9.
[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] LIU G,TU Z,WANG H,et al. Monitoring of the functional properties and unfolding change of ovalbumin after DHPM treatment by HDX and FTICR MS:functionality and unfolding of Oval after DHPM by HDX and FTICR MS[J]. **Food Chemistry**,2017,227:413-421.
[18] 满建民,蔡金文,徐斌,等. 作物淀粉晶体结构的波谱分析[J]. 作物学报,2012,38(4):691-698.
[19] DIAO X,GUAN H,ZHAO X,et al. Properties and oxidative stability of emulsions prepared with myofibrillar protein and lard diacylglycerols[J]. **Meat Science**,2016,115:16-23.
[20] 崔素萍,许琳,王颖,等. 超声波处理对低嘌呤脱脂豆粉巯基含量、疏水性及粒径分布的影响[J]. 食品科学,2015,36(21):50-55.
[21] DUBEY R,TOH Y R,YEH A I. Enhancing cellulose functionalities by size reduction using media-mill[J]. **Scientific Reports**,2018,8(1):1-11.
[22] 陈若辰. 高压射流磨制备燕麦全浆及对淀粉性质的影响研究[D]. 南昌:南昌大学,2020.
[23] 陈军,戴涛涛,刘成梅,等. 动态高压微射流在食品大分子改性方面的应用[J]. 中国农业科技导报,2015,17(5):106-113.
[24] 陈业宝. 温度和微射流处理对乳清分离蛋白颗粒性质的影响[J]. 现代食品科技,2017,33(9):115-121.
[25] LORDACHE M, JELEN P. High pressure microfluidization treatment of heat denatured whey proteins for improved functionality [J]. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**,2003,4(4):367-376.
[26] TU Z,YIN Y,WANG H,et al. Effect of dynamic high-pressure microfluidization on the morphology characteristics and physicochemical properties of maize amylose[J]. **Starch - Stärke**,2013,65(5):390-397.
[27] 游卿翔. 动态高压微射流对莲子淀粉结构及理化性质影响的研究[D]. 福州:福建农林大学,2020.
[28] CHEN J,LIANG R H,LIU W,et al. Degradation of high-methoxyl pectin by dynamic high pressure microfluidization and its mechanism[J]. **Food Hydrocolloids**,2012,28(1):121-129.

[29] 刘坚,江波,张涛,等. 超高压对鹰嘴豆分离蛋白功能性质的影响[J]. 食品与发酵工业,2006(12):64-68.
[30] 游卿翔,曾红亮,陈培琳,等. 动态高压微射流对淀粉结构特性和理化性质影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业,2019,45(19):307-315.
[31] 王淑洁. 微波和微射流降解果胶的研究[D]. 南昌:南昌大学,2017.
[32] 华慧. 动态高压微射流处理方式对果胶 - 乳铁蛋白复合物结构及性质的影响[D]. 南昌:南昌大学,2019.
[33] MARTELLI-TOSI M,MASSON M M,SILVA N C,et al. Soybean straw nanocellulose produced by enzymatic or acid treatment as a reinforcing filler in soy protein isolate films[J]. **Carbohydrate Polymers**,2018,198:61-68.
[34] 胡飞,陈玲,李琳. 马铃薯淀粉颗粒在微细化过程中结晶结构的变化[J]. 精细化工,2002(2):114-117.
[35] 陈剑兵,李英迪,谭兴和,等. 亚临界水改性果胶的抗氧化和抗肿瘤活性研究[J]. 食品科技,2020,45(6):316-321.
[36] MA M,MU T. Modification of deoiled cumin dietary fiber with laccase and cellulase under high hydrostatic pressure [J]. **Carbohydrate Polymers**,2016,136:87-94.
[37] 钟俊桢,涂越,刘伟,等. 动态高压微射流技术对乳清蛋白结构的影响[J]. 南昌大学学报(理科版),2013,37(6):552-557.
[38] BOUAOUINA H,DESRUMAUX A,LOISEL C,et al. Functional properties of whey proteins as affected by dynamic high-pressure treatment[J]. **International Dairy Journal**,2006,16(4):275-284.
[39] CHE L M,WANG L J,LI D,et al. Starch pastes thinning during high-pressure homogenization[J]. **Carbohydrate Polymers**,2009,75(1):32-38.
[40] 张雅芝. 白芸豆中非淀粉多糖分离纯化、基本结构特征及其在面包中的应用[D]. 南昌:南昌大学,2018.
[41] 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.
[42] 张本山,高大维,林勤保,等. 高交联马铃薯淀粉非晶化特性研究[J]. 中国粮油学报,1999(1):21-24.
[43] 吴进菊,赵晓丽,熊丽丽,等. 超高压微射流对藜麦淀粉结构和特性的影响[J]. 中国粮油学报,2022,37(4):70-75.
[44] 朱秀梅. 大米直链淀粉在动态超高压微射流均质中的机械力化学效应研究[D]. 南昌:南昌大学,2010.
[45] 张宏伟,唐爱民,陈港,等. 玉米、木薯氧化淀粉性能及对纸张的施胶效果[J]. 造纸科学与技术,2004(6):75-77.
[46] 谢宇,张宏伟. 高压微射流对木薯淀粉性质结构的影响[J]. 造纸科学与技术,2013,32(6):72-75.
[47] FORATO L A,BICUDO T D C,COLNAGO L A. Conformation of alpha zeins in solid state by fourier transform IR [J]. **Biopolymers**,2003,72(6):421-426.
[48] CHEN H,LI J,YAO R,et al. Mechanism of lipid metabolism regulation by soluble dietary fibre from micronized and non-micronized powders of lotus root nodes as revealed by their adsorption and activity inhibition of pancreatic lipase [J]. **Food Chemistry**,2020,305:1-8.
[49] 朱欣頔. 基于高压均质的柑橘纤维理化、流变和显微特性研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
[50] 刘成梅,熊慧薇,刘伟,等. IHP 处理对豆渣膳食纤维的改性研究[J]. 食品科学,2005(9):94-97.
[51] 张桃. 微颗粒化大豆蛋白的制备[D]. 广州:华南理工大学,2018.